



저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

# 고출력 백색 LED 열 저항 특성 및 신뢰성 향상



2014년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

이미지시스템공학과

이 충 현

공 학 석 사 학 위 논 문

# 고출력 백색 LED 열 저항 특성 및 신뢰성 향상

지도교수 김 종 수

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2014년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

이미지시스템공학과

이 충 현

이충현의 공학석사 학위논문을 인준함.

2014년 2월



주	심	이학박사	김 종 태	인
위	원	공학박사	정 용 석	인
위	원	이학박사	김 종 수	인

## <제 목 차 례>

국문 요약 .....	iv
ABSTRACT .....	vi
제 I 장 서 론 .....	1
제 II 장 이 론 .....	3
제 1 절 열 저항 .....	3
1.1 열 전달 개념 .....	3
1.2 열 전달 특성 분석 .....	4
제 III 장 실험 결과 및 분석 .....	19
제 1 절 고효율 LED PKG 제작 .....	19
제 2 절 열 저항 측정 .....	21
2.1 T3ster(ThermalTransienttest)의 System .....	21
2.2 열 저항 측정 .....	23
제 3 절 열 시뮬레이션 .....	27
제 4 절 신뢰성 측정 .....	28
제 5 절 수명 예측 .....	31
제 IV 장 결 론 .....	36
제 V 장 결 론 참 고 문 헌 .....	37

## <표 차례>

[표 1.] T3ster 장비	3
[표 2.] 1W LED PKG Junction temperature 변환	26
[표 3.] LED PKG material에 따른 열전도도	28



## <그림 차례>

[그림 1.] Junction temperature에서의 열 전달 경로.....	6
[그림 2.] 온도 감응 계수(k-factor)그래프.....	9
[그림 3.] 시간에 일정한 스펙트럼의 이산성과 연속성.....	11
[그림 4.] LED 소자의 RC 등가 회로 구성 시 Foster와 Cauer model .....	13
[그림 5.] 누적 구조 함수 그래프와 미분 구조 함수 그래프 .....	14
[그림 6.] LED를 이용한 백색 구현 방법.....	20
[그림 7.] 1W급 LED Package .....	21
[그림 8.] [그림 8.] T3-ster system.....	22
[그림 9.] Die adhesive dotting .....	23
[그림 10.] 미분구조 함수 그래프 상[A], 하[B].....	25
[그림 11.] Junction temperature 계산식 .....	26
[그림 12.] 온도 분포 상태 simulation .....	27
[그림 13.] 신뢰성 data 상[A], 하[B] .....	30
[그림 14.] Life time calculation equation .....	31
[그림 15.] 25도 수명 예측.....	32
[그림 16.] 60도 수명 예측 .....	33
[그림 17.] 85도 수명 예측 .....	34

## 국문요약

고출력 백색 LED 열 저항 특성 및 신뢰성 향상

이 충 현

부 경 대 학 교 대 학 원 이미지시스템공학과

### 요 약

본 논문은 LED chip을 package에 붙일 때 쓰이는 접착제 양에 의한 열 특성 개선 및 신뢰성 향상에 관한 논문으로써, 1W급 EMC 사출수지 package에 YAG 형광체를 사용하여 제작하고 chip을 package에 붙일 때 쓰이는 접착제가 chip 면적에 분포되어 있는 상태에 따라 열 저항 값이 다르게 나타나는 것을 확인하였다. LED package에서 열은 신뢰성에 중요한 요소 중 하나이므로 접착제의 양을 조절함으로써 열 특성 개선과 신뢰성 향상 방안을 제시한다.

LED Packaging 과정 중 Die bond 재료로 Ag epoxy 접착제를 사용하여 Packaging 한 후 T3ster 열 특성 분석 장비로 열 저항 값을 측정하였다. Ag epoxy 양을 chip 면적에 균일하게 도포된 package와 그렇지 않은 package의 열 저항 값을 측정하였고, 균일하게 도포된 package의 열 저항 값이 그렇지 않은 package보다 3.5°C/W 낮은 열

저항 값을 나타내었다. 이 두 package 열 저항 값을 바탕으로 25도, 60도, 85도 환경에서 신뢰성 차이가 얼마나 나는지를 2000시간 동안 동작 시험을 한 결과 25도에서 약 33000시간, 60도에서 약 14000시간, 85도에서 약 7000시간으로 chip 면적에 균일하게 도포된 LED package가 신뢰성이 우수하다는 결과를 얻을 수 있었다.

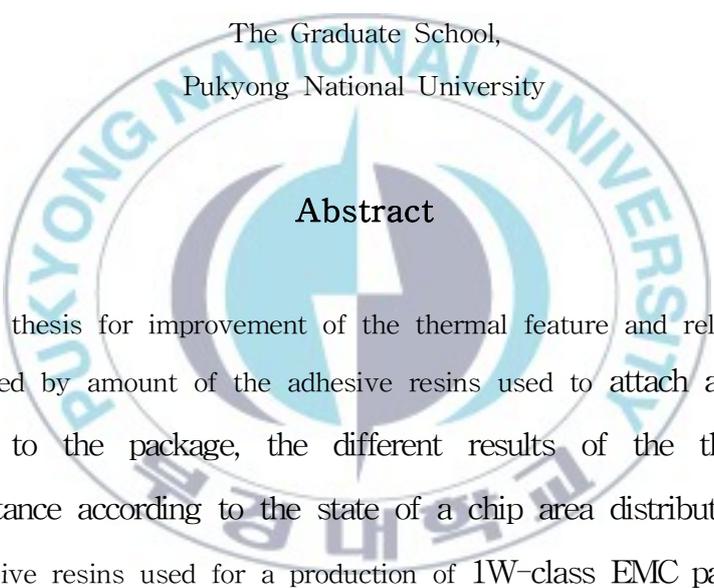
본 연구를 통해 Die adhesive 토출 양을 chip면적에 균일하게 도포함으로써 열적 특성을 최적화 하고 신뢰성 향상이라는 결과를 얻을 수 있는 방향을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 방향이 향후 1W급 이상의 LED package 및 High power COB 개발에 기여 할 수 있을 거라 생각 된다.



The properties of high-output white LED on the thermal resistance  
and improving reliability

Chung Hyun Lee

Department of Division of Image information Engineering,  
The Graduate School,  
Pukyong National University



## Abstract

As a thesis for improvement of the thermal feature and reliability induced by amount of the adhesive resins used to attach a LED chip to the package, the different results of the thermal resistance according to the state of a chip area distributed by adhesive resins used for a production of 1W-class EMC package with a YAG phosphor and also to attach a LED chip to the package were ascertained. Since the heat is one of the crucial factors in LED package, this study made a proposal on improvement of thermal feature and reliability by regulating the amount of adhesive resins. The results of thermal resistance were

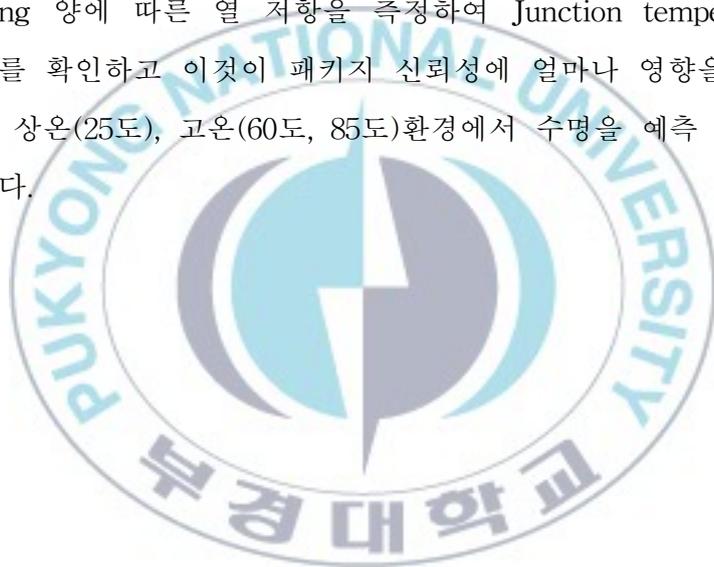
measured by T3ster after packaging using Ag epoxy resins as a Die bond material in the process of LED Packaging. Moreover, the amount of Ag epoxy was determined through the values of the thermal resistance between the package evenly distributed in the chip area and otherwise. The values of the thermal resistance of the package evenly applied in the chip area had shown 3.5 °C/W lower thermal resistance than not uniformly applied one. The superiority of the package evenly applied in the chip area which was caused by about 33,000 hours at 25 degrees, 14,000 hours at 60 degrees, 7000 hours at 85 degrees were obtained from operational experiment examined during 2000hours to confirm how much reliability difference exists in an environment of 25 degrees, 60 degrees, 85 degrees based on two results of the thermal resistance. It is suggested through this study that the way to improve the reliability and to optimize thermal properties by uniformly painting the amount of Die adhesive discharge to the chip area is effective. I expect the suggestions made from this study would be committed for the futher development of over 1W-class LED package and also High power COB

## 제 I 장 서 론

“LED”가 차세대 광원으로 주목을 받으면서 자연스럽게 신뢰성의 문제가 계속 대두되고 있다. LED는 전기에너지를 빛에너지로 변형하여 그 빛을 다양한 방면에 사용하는 소자이다. 광원으로써의 LED는 고효율, 저소비전력, 장수명, 소형/경량화, 다양한 색상구현, 위험물질 미사용 등의 기존의 다른 광원과 차별되는 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 LED에서 전기에너지가 빛에너지로 변환할 때에 반드시 열이 발생되게 되며, 이러한 LED의 발열과 이에 따른 방열은 LED의 작동과 신뢰성에 있어서 고려해야 될 매우 중요한 요소 중의 하나이다. 백색 LED의 수명은 백열전구와 같이 필라멘트가 단선됨으로써 결정되는 수명이 아니라, 점등시간에 따라 구성 부재가 열화 되어 광속이나 특성의 초기 값의 변화로 결정된다. 물리 현상적으로 표현하면 “열화란 물질의 반응이 진행되어 보다 안정된 상태로 변화하는 것 뿐” 이라고도 할 수 있으므로 LED 제품을 안정된 상태로 사용하고 싶다면 반응을 촉진시키지 않는 것이 매우 중요한 것이다. 열화 하는 부분은 백색 LED를 구성하는 반도체 칩, 형광체, 수지 케이스, 봉지수지 등으로 나누어 생각할 수 있으며 수

지 봉지한 백색 LED의 경우 반도체 칩 보다도 봉지 재료인 투명수지가 빛과 열에 의해 열화 되는 것이 광속감쇄나 특성 변화의 주요 요인이었지만, 현재는 개선이 진행되고 있다.[1]

따라서 본 논문에서는 국내에 유통되고 있는 1W급 High - Power LED(루미마이크로 제품)를 사용하여 Die adhesive dotting 양에 따른 열 저항을 측정하여 Junction temperature 차이를 확인하고 이것이 패키지 신뢰성에 얼마나 영향을 끼치는지 상온(25도), 고온(60도, 85도)환경에서 수명을 예측 비교해 보았다.



# 제 II 장 이 론

## 제 1 절 열 저항

### 1.1 열 전달 개념

열은 물질 내부의 여기 된 분자의 진동상태의 강도에 따라 뜨거운 정도가 구분된다. 강한 진동으로 인하여 물체에서 발생되는 열에너지가 높을 경우 발생된 열은 주변과 평형상태를 유지하고자 하는 물성으로 인하여 평형상태에 도달하게 된다. 임의의 물질이 평형 온도에 도달하기 까지는 여러 가지 변수가 작용되지만, 질량과 잠복열에 대한 변수가 가장 큰 역할을 하며, 평형온도에 도달하는 속도는 주변온도와 임의의 물질간의 온도차와 얼마나 빠른 시간 내에 열이 뜨거운 물질에서 차가운 물질로 전달되는가에 따라 달라진다[2].

열 전달은 전도(conduction), 복사(radiation), 대류(convection)의 세 가지 방법으로 열의 흐름이 발생된다. 전도는 단지 고체 내부에서만 발생되며, 한 고체 내부나 두 인접한 고체 사이에서 다른 원자에 의하여 움직이지 않고 분자의 진동에 의하여 열에너지가 점차 확산되며 전달되는 것을 말한다. 복사는 전도와 유사하게 물질 내부 원자들의 진동에 의하여 발생된 전자기파의

방사에 의하여 열에너지가 전달되는 것을 말한다. 대류는 전도나 복사와 유사한 열전달 방법이지만, 유체를 통하여 여기된 입자가 진동 뿐 아니라 이동을 하여 열에너지를 전달하므로 진동에 의하여 열에너지를 전달한다는 열전달의 정의가 부분적으로만 적용된다. 하지만, 대류 또한 높은 온도에서 낮은 온도로 에너지가 전달된다는 기본 개념을 준수하기 때문에 “열 전달“의 분류에 포함시키고 있다.

## 1.2 열전달 특성 분석

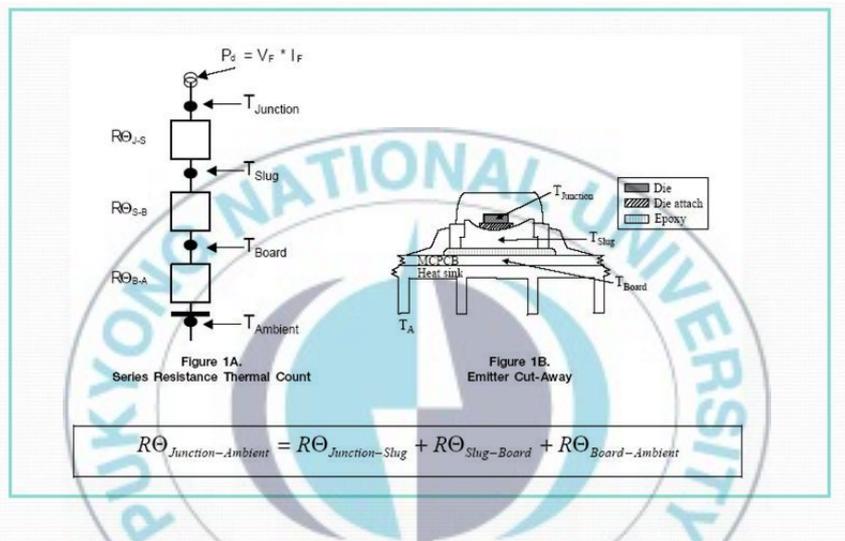
### (1) LED의 발열 특성

일반적으로 Package소자의 열 특성을 객관적으로 비교하기 위하여 가장 중요한 정보로 이용되는 것은 Package소자의 열 저항 특성이다. 일반 전자 소자의 Packaging에서 열 저항에 관한 표준 기술은 MIL-STD, EIA / JEDEC, SEMI 등에서 규격화되어 있지만 현재 고출력 LED에 대한 열 특성 분석 기술과 측정에 대한 표준은 전무한 상태이다. 일부 major급 LED 업체 및 미국 내에서 정책적으로 각자의 방법에 따라 열 저항을 측정하여 제시하고는 있지만 관련 기술이 미흡하고 표준화 자체가 아직은 보급되지 않은 상태이기 때문에 LED 제품을 사용하는 구매자들에게 충분한 정보를 제공하지 못하고 있는 실정이다. 따라

서 향후 이에 대한 대비가 국가적 차원에서 필요한 시점이며 LED 소자의 지속적인 발전을 위하여 열 저항에 대한 평가가 조속히 정립되어져야 할 것으로 판단된다.

LED Package가 동작할 때 접합부에서 발생하는 열은 엄청난 것이며, 이 발열량으로부터 접합부를 보호하면서 주변온도의 상승으로 인한 접합온도의 상승을 얼마나 낮추느냐에 따라 LED의 수명은 달라진다. 열 설계에 이용되는 기본적인 해석 방법 중 하나는 열 저항( $R\theta$ )이며, 열 저항은 해당 전력 소산에 대한 온도 변화의 비율로 정의된다. 열에너지의 발산 구조인 내부 구조는 열 저항을 통하여 수치적으로 비교가 가능하다. 이러한 열적 전달 경로는 [그림 1.]에서 나타나듯이  $T_j$ 에서  $T_s$ ,  $T_b$ 를 순차적으로 통과하여 대기로 열이 전달되는 과정 중 열전달을 방해하는 성분을 전기적 저항 개념을 도입하여 도식화로 표현하였다. 외부에서 전류가 인가되면 소자의 lead를 통하여 chip에 전달되며 이때 PN 접합 영역에서 에너지를 받아 여기된 전자(electron)가 안정된 상태로 돌아오며 발산되는 에너지의 일부가 열 에너지로 방출된다.(이 부분의 온도를  $T_{Junction}$  으로 표기하였으며, 접합 온도를 나타낸다.) 이곳에서 발생된 열은 chip 상단부와 하단부로 각각 전도되지만 상단부의 봉지재(encapsulant resin)를 통하여 외부 대기로 전도되는 열 저항은

미비하므로(약 5%정도임)무시하고, 일반적인 고려 대상인 chip에서 발생된 열이 chip 하단부를 통하여 외부로 발산되는 경로를 통하여 주변간의 상호 연속적인 열 저항만을 고려할 것이다.



[그림 1.] Junction temperature에서의 열 전달 경로

여기서,  $T_{epoxy}$ ,  $T_{Junction}$ ,  $T_{Slug}$ ,  $T_{Board}$ ,  $T_{Ambient}$  는 다음과 같이 정의한다.

$T_{Junction}$  : Chip의 접합영역에서 발생하는 온도

$T_{Slug}$  : Frame내부의 열 전달 매체(Slug)를 경유하며 발생하는 온도

$T_{Board}$  : LED 소자를 부착한 PCB(Printed Circuit Board)에서

발생되는 온도

$T_{\text{Ambient}}$  : LED 소자의 주변 온도

LED Package 소자의 열 저항은 접합부-표면의 온도, 접합부-주변 또는 특정부위의 온도를 측정하여 그 온도 차이를 유발시키는 저항을 산출하는 것이다. LED Package 소자의 열 저항은 식 (2-1)과 같이 표현할 수 있다.

$$R_{\text{thJunction-Ambient}} = \Delta T_{\text{Junction-Ambient}} / P_d \quad (2-1)$$

여기서,  $R_{\text{th}}$ 는 접합부에서 외부까지의 전체 열 저항의 합을 나타낸 것이며,  $\Delta T$ 는 접합부와 외부 온도와의 차이를  $P_d$  입력전압 ( $V_f$ )과 입력전류( $I_f$ )의 곱으로 소비되는 전력( $W$ )을 의미한다. chip의 접합 면적에서 발생된 에너지는 빛 에너지로 변환된 일부를 제외하고는 열 에너지로 발생되어 Diepaste와 Package substrate를 경유하여 대기로 발산한다. LED Package 소자의 전체 열 저항은 직렬저항의 연결로 간주되어 개별 열 저항의 합으로 도출한다. LED Package 소자의 내부 chip PN 접합 온도는 이 각각의 열 저항의 합을 차후에 소개될 접합 온도 구하는 수식에 대입함으로써 구할 수 있게 된다[3]. 이렇듯 LED Package 소자의 온도인 chip 내 접합 온도는 열 저항

$R_{thJunction-Ambient}$ 과 비례 관계를 갖고 있다. 이 열 저항을 낮추기 위해서 열 저항의 비중이 큰 인자부터 부분적으로 낮추기 위해 노력하고 있다.

## (2) 열 특성 분석 기술

고출력 LED의 열 특성 분석을 위한 기술은 물리적인 열 측정법, 전기적 열측정법, 광학적 열 측정법으로 크게 3가지로 분류 되는데 본 연구에서는 전기적 열 측정 방법을 적용하였다.

이 방법의 최대 장점은 LED Package소자를 손상시키지 않고 열 저항을 유추 할 수 있는 것이지만 접합부의 평균 온도 값만이 측정가능하다는 단점이 있다. 그럼에도 불구하고 이 방법은 현실적으로 접합 영역에서 직접 측정이 불가능한 상황에서 비파괴 적이면서 실측에 가장 가깝게 접근할 수 있으므로, 현재 가장 많이 사용되는 LED Package소자의 열 특성 분석 방법이다. LED는 PN 접합 diode로서 입력전압(forward voltage)과 소자와 온도 사이에는 식(2-2)과 같은 공식이 성립된다.

$$I_F = I_s [\exp(qVF/kT_j) - 1] \quad (2-2)$$

여기에서  $I_s$ 는 역방향 포화전류,  $VF$ 는 순방향 전압,  $T_j$ 는 접합

온도  $k$ 는 Plank상수,  $I_F$ 는 순방향 전류이다. 일반적으로  $V_F$ 가 0.1V 보다 크므로 위 식에서  $-1$ 은 무시할 수 있을 정도의 미세한 전류를 나타내므로 제외하고  $\ln$ 을 양 변에 적용하여 정리 하면 식(2-3)과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$V_F/T_j = (k/q) \times \ln(I_F/I_s) \quad (2-3)$$

이 식으로부터 이상적인 PN 접합에서 일정한 순방향 전류 (sensor current)를 인가하였을 때 순방향 전압과 온도 사이에 일정한 비례관계가 성립됨을 알 수 있으며, 이 비례상수를 TPS(Temperature Sensitive Parameter), 혹은 보통 온도 감응 계수(k-factor)라고 불린다. 온도 감응 계수의 단위는  $V/^\circ C$ 이다. [그림 2.]은 고출력 LED Package소자에 5mA의 sensor전류를 인가하였을 때 얻어낸 온도 감응 계수 그래프이며, 이와 같이 LED 소자를 구동하여 안정시킨 후 sensor전류만 인가하여 냉각시킬 때 시간에 따른 온도함수를 그린 냉각 곡선(cooling curve)data를 기반으로 하여 열분석을 진행한다.



[그림 2.] 온도 감응 계수(k-factor) 그래프

이중 냉각 곡선에서 구조 함수(Structure function)의 이론적 배경을 적용하여 열적 평가를 진행할 수 있으며, 첫 단계로서 전기적 초기과도전류(initial transients)를 필터링하여  $a(t)$  과도 전류곡선(transient s curve)을 완만하게 조절하여  $a(z)$ 로 변화시켜 표현하는 것이다. 측정된 과도 전류 곡선으로부터 미분구조 함수 계산을 위하여 시간을 log 함수로 취하고( $z=\ln(t)$ ) 유도된 보조함수  $da(z)/dz$ 를 계산한다. 이를 좀 더 자세히 알아보기 위하여 시간에 일정한 스펙트럼 및 complex loci 계산을 알아보고자 한다.

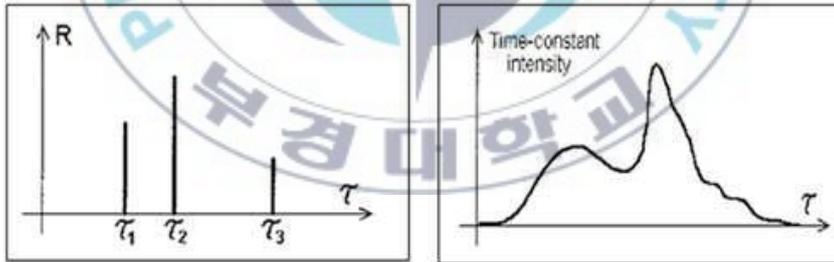
① 시간에 일정한 스펙트럼(time constant spectrum) 계산

$$da(z)/dz=R(z)\otimes w(z) \quad (2-4)$$

여기서  $R(z)$ 는 시간에 일정한 스펙트럼이고,  $\otimes$ 는 회선 연산자(convolution operator)이며,  $w(z)=\exp(z-\exp(z))$ 이다.  $R(z)$ 는 network가 무한히 분산된 연속적인 함수이고, 이 식을 통하여 식(2-4)와 같이 표현할 수 있다[4].

$$R(z)=\lim_{\delta z \rightarrow 0} \left( \frac{\text{magnitudesr elating time-constants between } z \text{ and } z+\delta z}{\delta z} \right) \quad (2-5)$$

또한, 시간에 일정한 스펙트럼의 이산성과 연속성은 하기 [그림 3.]와 같이 나타난다.



(a) 시간에 일정한 스펙트럼의 이산성

(b) 시간에 일정한 스펙트럼의 연속성

[그림 3.] 시간에 일정한 스펙트럼의 이산성과 연속성 [5]

$R(z)$ 를 구하기 위하여 역회선(deconvolution)을 진행해야 되며,

이때 Bayesiteration 방법을 이용한다.

유도된 시간이 일정한 스펙트럼은 수학적으로 매우 간단하지만, noise를 제거한 정확한 과도 전류 계산을 위하여 초기 과도 전류를 보정해 주어야만 정밀한 값을 얻을 수 있으며, 시간에 따른 시간이 일정한 강도 그래프를 얻을 수 있다[6].

## ② Complexloci계산

조화 가진(harmonicexcitation)에서 구동점(driving-point)과 모든 주파수에서의 전이(transfer)저항들은 Bode와 Nyquist의 그림으로 그릴 수 있다.이것을 보통 complexloci라 부르며 주파수에 따른 저항의 실수부와 허수부분을 나타낸다. 시간에 의존한 함수로부터 주파수에 의존한 함수로 변환 시킬 때  $da(z)/dz$ 함수로부터 시작된다. 식(2-6)과 식 (2-7)로 부터 간단하고 빠른 회선 알고리즘(convolution algorism)으로 수렴하는 결과를 얻을 수 있다.

$$\text{Re}(Z(\Omega))=((WR(\Omega)\otimes da)/dz)|_{\Omega=-z} \quad (2-6)$$

$$\text{Im}(Z(\Omega))=((WI(\Omega)\otimes da)/dz)|_{\Omega=-z} \quad (2-7)$$

여기에서, $WR(\Omega)=\text{cose}\theta$ , $WI(\Omega)=\text{sine}\theta$  이다.

### ③ Pulse열 저항 계산

Pulse 열 저항 그래프는 주기적인 pulse 여진 하에서의 package의 역동적인 열 특징을 나타낸다. 전환(switching) 시간이 충분히 짧을 때 냉각/가열(cooling/heating)하는 주기가 짧을수록 소자의 온도는 낮다. 주기가 0에 근접할수록 매우 길게 전환되는 상태이므로 일정주기의 전력에 따라 초기의 heating transients 함수를 얻을 수 있다. 식(2-8)은 Rthp 함수를 직접 구할 수 있도록 수식화한 것이다.

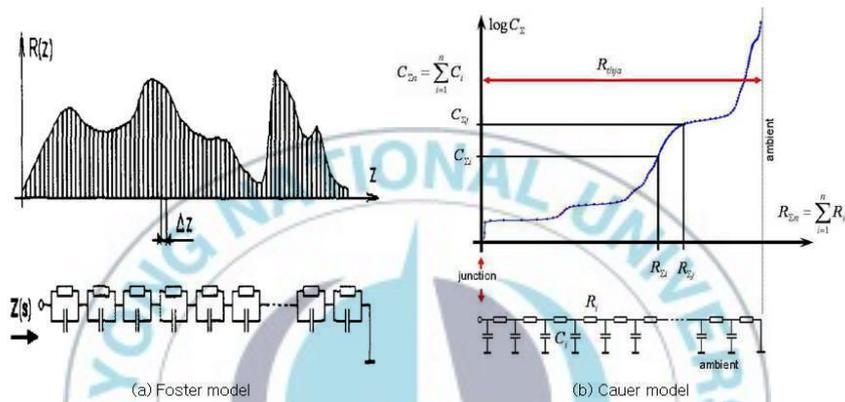
$$R_{thp}(Z=\ln t, \delta) = R(z) \otimes wrthp(z, \delta) \quad (2-8)$$

여기서,  $wrthp(z, \delta) = (1 - \exp(-\exp(z))) / (1 - \exp(-\exp(z)\delta))$ 이다.

### ④ 구조 함수 계산

시간에 일정한 밀도 그래프(Time constant density graph)는 무한히 좁은 한정된 영역에서 높이를 갖는  $R(z)$  함수로서 등가적인 병렬 RC Foster 회로를 구성할 수 있으며, RC Foster 회로를 구성 시 Foster model로부터 등가회로인 Caue model을 변환할 수 있다. Foster model에서 Cauer model로 등가 변환하는 이유는 개별 영역에서 각각의 열용량을 고려하는 것 보다 주변과의 상호관계를 고려하여 열용량을 계산하는 것이 좀 더 물리

적 의미에 가깝기 때문에 변환하여 표현 하였다. 등가 변환된 Cauer model로부터 누적 구조함수인  $C\Sigma$ (열용량의 합)와  $R\Sigma$ (열 저항의 합)을 나타낼 수 있다.

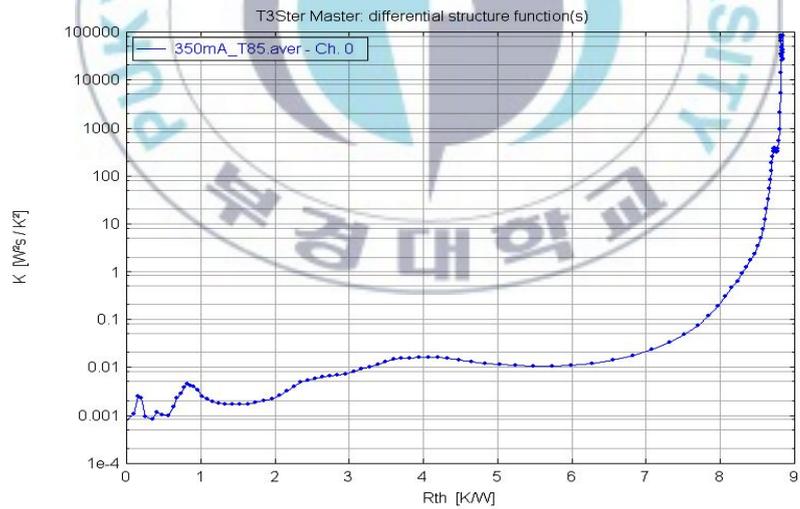


[그림 4.] LED 소자의 RC 등가 회로 구성 시 Foster와 Cauer model[7]

[그림 5.]의 그래프는 LED 시료로부터 얻은 누적 구조함수를 그래프화한 것이다. 구조함수 그래프 중 단계적으로 평편한 부분은 하나의 재질을 의미하고, 넓이는 열 저항의 크기를 나타내며, 직선적으로 변화되는 구간은 열전도가 선형적으로 변화되는 영역을 나타내고 있다.



(a)누적 구조 함수 그래프



(b)미분 구조 함수 그래프

[그림 5.]누적 구조 함수 그래프와 미분 구조 함수 그래프

Protonotarios-Wing 함수의 변형이 미분 구조함수이며, 이 함수는 누적 열 용량( $C\Sigma$ )과 누적 열 저항( $R\Sigma$ )을 편미분한 함수이다. 즉, 미분 구조 함수는 누적되는 열 저항과 누적되는 열 용량으로부터 식(2-9)과 같이 정리할 수 있다.

$$K(R\Sigma) = dC\Sigma / dR\Sigma \quad (2-9)$$

이 식에서  $dC\Sigma = cA da, R\Sigma = dx / \lambda A$  으로 정의하며,  $c$ 는 체적 열용량,  $\lambda$ 는 열전도도이며,  $A$ 는 열이 전도되는 방향의 단면적을 의미한다. 식(2-9)에  $dC\Sigma$  및  $R\Sigma$ 를 대입하여 정리하면, 식(2-10)와 같은 미분 구조함수식으로 변환할 수 있다.

$$K(R\Sigma) = cA da / (dx / \lambda A) = c\lambda A^2 da \quad (2-10)$$

$K(R\Sigma)$ 는 재료의  $c$ 와  $\lambda$ 에 비례하며, 열이 흐르는 횡단면적  $A$ 에 비례한다. 이는  $K(R\Sigma)$ 가 누적하는 저항의 함수로서 열이 흐르는 전달 면적과 축적 저항과의 관계를 나타나게 되는 것이며, 이 함수에서 결정은 열 흐름 경로에서 재료의 새로운 표면을 나타나게 되고, 간격은 재료와 표면 사이에서의 열 저항을 보여주는 것으로 시스템의 구조에 의하여 밀접한 영향을 받는다.

다.

### (3) 열 Modeling 기술

실제 Package나 chip을 제작하기 전에 그 열적인 특성을 미리 예측하는 modeling 기술은 매우 중요하다. 직접 test를 통한 오류를 사전에 예측 및 보완할 수 있기 때문이다. 이에 대표적인 두 가지의 열 설계 modeling을 하기와 같이 제시할 것이며, 본 연구에 적용된 유한 체적법에 대하여는 자세히 설명하고자 한다.

#### ① 단위 열 분포 접근법(Unit temperature profile analysis)

LED chip의 열적 특성 modeling을 위하여 단위 열 분포 접근법을 응용하는 방법으로 접근하는 방법이 분석적 열 해석 방법이며, 회로망에 대한 설계가 필요 없고 무엇보다 시각적인 열원을 원형 열원으로 일반화하였기 때문에 간단하면서도 정확하고 빨리 소자와 Packaging의 열적 특성을 분석할 수 있는 장점이 있다[8].

인입 열원을 가진 평면구조의 사분면에서 단위 열점원이 첫 번째 층과 두 번째 층 사이에 끼워져 있고 두 번째 구조의 중앙에 수평으로 위치한다고 가정하면, 정상상태에서의 온도분포는 식(3-1)과 같이 열전달 방정식에 의하여 결정된다[9].

$$K_x \omega \cdot (\partial^2 \psi \omega / \partial x^2) + K_y \omega \cdot (\partial^2 \psi \omega / \partial y^2) + K_z \omega \cdot (\partial^2 \psi \omega / \partial z^2) = 0$$

(3-1)

계산시의 인입단의 전력 값은 전기적 인입단의 전력과 광 출력의 차이로서 적용이 되며, 단위 열 분포 접근법의 modeling을 위하여 단위 열원(unit thermal source)을 정의하여 형상을 생성한 후 열원을 인가하게 된다. 단위 열전달 계수와 두께에 따른 열전달 계수에 따른 영향에 따라 chip에 대한 온도는 달라지며 최적의 열 설계가 가능해진다.

② 유한 요소법 및 대류에 의한 열전달 효과분석을 통한 열 설계(유한 체적법)

LED Package소자의 열 설계를 위한 또 하나의 modeling으로 유한 요소 해석법을 이용한 LED Package소자의 열적 거동 추측과 slug 및 방열판의 설계를 들 수 있다. 유한 요소 해석(Finite Element Analysis)이란 구조물 내의 무한개의 미지수점을 절점(node)을 이용하여 유한개의 이산화 된 위치로 나타내고, 이들 간에 서로 유기적 관계를 맺어 주는 요소(element)인 block을 이용하여 전체 구조물이나 실제의 물리적 체계들을 절점들의 변위를 미지수로 하는 연립방정식으로 나타내어 이를

계산하여 각 절점에서의 원하는 값을 수치적인 근사화를 통해 얻어내는 것을 말한다[10] LED형태에 대한 열분석을 위해서는 기하학적인 model의 생성 후에 LED를 구성하고 있는 소재들에 대한 열전도도를 비롯한 물성값과 함께 인입단의 전력, 주변의 온도 및 대류 열전달 계수의 정확한 입력이 필요하다.LED Package소자의 열 설계를 위해서는 Package소자와 주변간의 대류에 의한 열전달 효과분석 및 model정립이 반드시 필요하다. 그러나 대류에 의한 열 유동은 매우 복잡하고 다양한 형태를 갖고 있으므로 이러한 열분석을 하기 위해서는 유한 체적 접근법을 통하여 분석한다. 유한 체적접근법(Finite Volume Approach)이란 구조물을 무한개의 체적을 이용하여 공간을 차분하여 질량 및 운동량, 에너지 보존법칙에 의하여 수치적으로 풀릴 수 있는 대수의 형태로 변환한다면, 열원에 대해 하기 식 (3-2)와 같은 Navier-Stokes방정식을 도출할 수 있다.

$$\partial / \partial t(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho V\phi - r\rho \nabla \phi) = S\phi \quad (3-2)$$

여기서  $\rho$ ,  $\phi$ ,  $r$ ,  $S$ ,  $V$ 는 다음과 같이 정의한다.

$\rho$  =The dependent variable

$\phi$  =Density mass of material per unit volume (typical unit:kg/

m<sup>3</sup>)

r =Corresponding diffusion coefficient

S =Source term

V =Magnitude of the velocity vector

그리고 이를 다음과 같은 CFD(Computation Fluid Dynamics) 형태의 수식으로 식(3-3)과 같이 변환할 수 있다.

$$\begin{aligned} & \rho \phi \\ & = \partial_x \phi \partial_x + \partial_y \phi \partial_y + \partial_z \phi \partial_z + \partial_t \phi \partial_t + \\ & S_p \quad (3-3) \end{aligned}$$

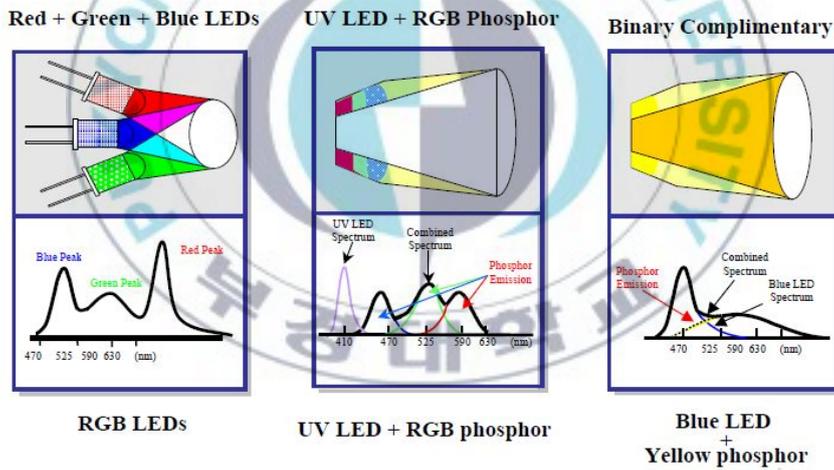
이때에 서로 다른 경계 조건들에 대해 반복적인 계산 과정을 통하여 대류 열 전달 계수를 순차적으로 대입, 수렴하고 수치적인 근사화를 통하여 열 저항을 얻어낼 수 있다[11]

## 제 III장 실험결과 및 분석

### 제 1절 고효율 LED PKG 제작

현재까지 개발된 LED를 이용한 백색의 구현 방법은 크게 [그림 6.]과 같이 각각의 적색, 녹색, 청색 LED를 조합하는 방법과[12], 근자외선 LED와 자외선을 흡수하여 적색, 녹색, 청색을 발광하는 형광체를 혼합하여 결합하는 방법[13], 그리고 청색 LED와 황색 형광체를 조합하는 방법이 대표적이다[14-16]. 각각의 적색, 녹색, 청색 LED를 조합하는 방법은 3개의 LED가 필요하기 때문에 제조단가가 비싸고, 지향각이 좁은 LED의 특성으로 인하여 각각의 적색, 녹색, 청색 잘 혼합되지 못하여 따로 보이는 색분리 현상이 나타나기 때문에 이를 제거하기 위해서는 별도의 광학렌즈가 추가로 필요하게 되는 단점을 가지고 있다. 근자외선 LED를 이용하여 백색을 구현하는 방법은 현재까지 고휘도의 근자외선 LED가 개발되지 않아서 고휘도의 백색을 구현하는데 어려움이 있으며, 근자외선 LED의 제조단가가 비싸다. 또한 각각의 혼합되는 형광체의 온도특성이 다르기 때문에 많은 열이 발생하는 LED에서는 장시간 안정적인 백색을 구현하지 못한다. 청색 LED와 황색 형광체를 결합한 W-LED는 고휘도

의 청색 LED가 개발됨에 따라 높은 출력과 간단한 제조공정, 비교적 저렴한 제조단가 등의 장점들로 인하여 현재 상용화된 W-LED 들의 대부분이 이 구조를 취하고 있다. 이에 본 연구에 사용된 W-LED는 고휘도 청색 vertical LED chip(Cree社)에 열적 안정성이 뛰어난 YAG 황색 형광체를 결합한 EMC(Epoxy molding compound) PKG(루미마이크로社)에 350mA 5직렬로 구동하여 [그림 6.] 1W급 고출력 LED를 제작하여 실험 하였다.



[그림 6.] LED를 이용한 백색 구현 방법



[그림 7.] 1W급 LED Package

## 제 2절 열 저항 측정

### 2.1 T3ster(Thermal Transient test)의 System

#### ① T3ster 장비 사양

본 연구에서 열 특성 측정기기로 사용된 장비는 루미마이크로에서 보유하고 있는 T3ster이며, 장비에 대한 사양 및 모식도는 [표 1.]과 [그림 8.]에 나타내었다.

장비	LED ThermalTransientTester(T3ster)
회사	Mentor graphics
software	MicReD
측정 장소	루미마이크로

[표 1.] T3ster 장비

② 열 저항 측정 장비 구성

장비는 Main system unit과 thermostat module 및 PC로 구성 되어 있으며, 항온조의 주변 온도(ambient temperature)는 25℃ 로 일정하게 유지되고 있다.

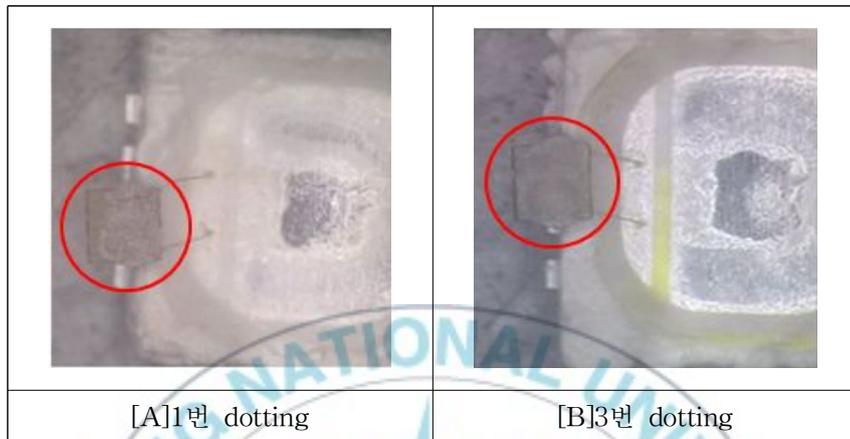


[그림 8.] T3-ster system

## 2.2 열 저항 측정

### ① 열 저항 측정 시료

본 연구에서는 1watt급 EMC Package소자의 Die adhesive dotting 양에 따른 열 저항 특성을 비교하여 신뢰성에 얼마나 영향을 미치는가가 연구의 목적이므로, Ag type die adhesive를 epoxy pin으로 1번 dotting한 PKG와 3번 dotting한 PKG를 통하여 비교 측정 하였다. LED PKG lead frame에 dotting하여 chip 면적에 얼마만큼 퍼져 있는가를 그림()에 나타내었다. [A]의 경우 chip 면적만큼 접착제가 고르게 퍼져 있지 않는 것을 확인 하였다. 이는 void 공기층이 형성되 열이 빠져나가는데 방해가 하게 된다. 즉, 열 저항이 높아져 신뢰성 저하의 원인이 된다. 반면 [B]의 경우 Ag 접착제가 chip 면적에 고르게 분포되어 있는 것을 확인하였다. 이 두 시료에 대한 T3star 열 저항 측정기로 열 저항을 측정해 보았다.

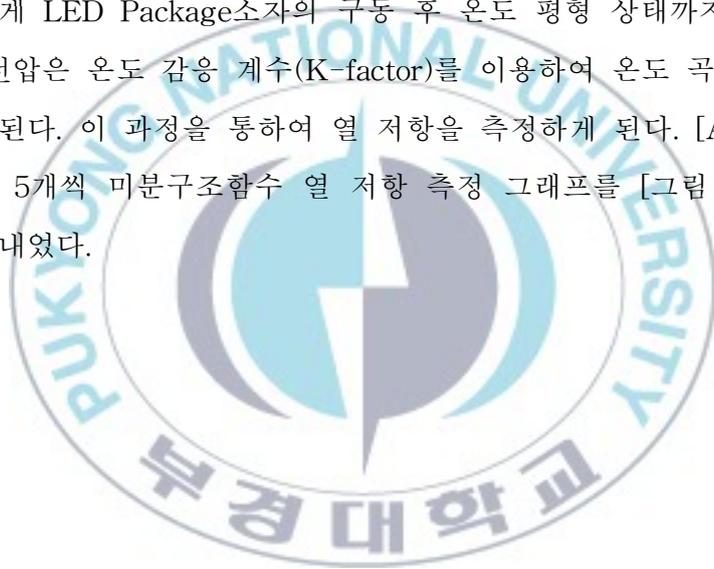


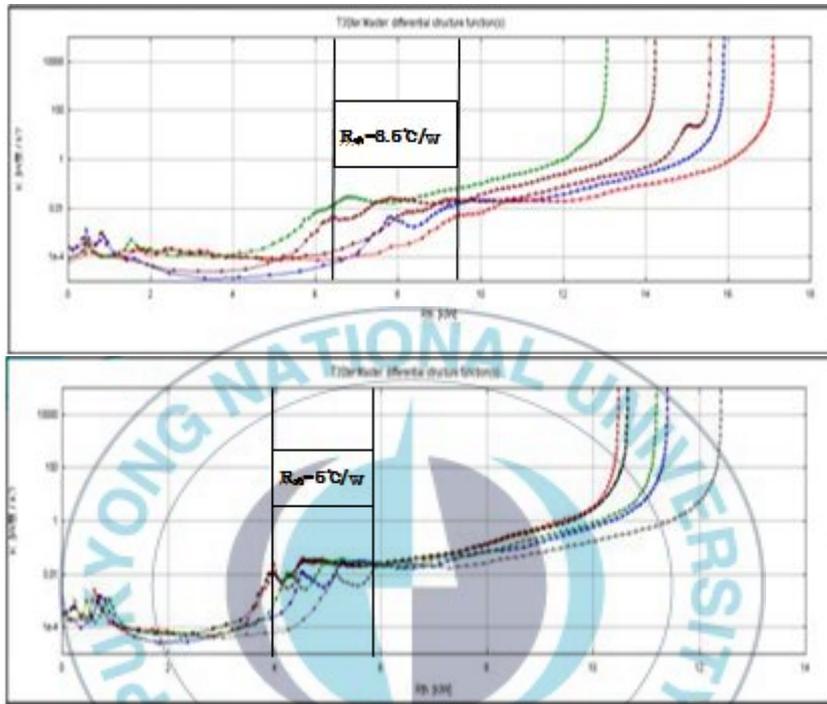
[그림 9.] Die adhesive dotting

## ② 열 저항 측정

각각의 시료를 T3ster의 temperature stage에 thermal grease를 사용하여 공기층이 발생되지 않도록 장착한 후, 구동 software의 sensor current를 5mA로 설정한다. 그 이후 LED chip PN 접합부의 온도를 측정하기 위하여 주변의 온도를 25℃~55℃까지 15℃간격으로 변화시켜 전압 변화량을 측정하여 선형적 기울기에 따른 온도 감응 계수(K-factor)를 구한다. 측정된 온도 감응 계수(K-factor)를 T3ster의 구동 software에 입력하고, Drive current 350mA(Emitter current 345mA + Sensor current 5mA) 시료에 20초 동안 인가하여 chip이 안정

되도록 구동시킨 후 5mA의 sensor current만 인가하여 순방향 전압의 변화량을 단위시간마다 측정한다. 구동 시 주변 온도는 thermo electric cooler를 이용하여 25℃로 일정하게 유지시켜 junction에서 부터 PCB까지 발생된 열이 thermal grease를 통해 temperature stage 전도되어 온도 평형 상태를 만들게 한다. 이렇게 LED Package소자의 구동 후 온도 평형 상태까지 측정된 전압은 온도 감응 계수(K-factor)를 이용하여 온도 곡선으로 변환된다. 이 과정을 통하여 열 저항을 측정하게 된다. [A], [B] 시료 5개씩 미분구조함수 열 저항 측정 그래프를 [그림 10.]에 나타내었다.





[그림 10.] 미분구조 함수 그래프 상[A], 하[B]

측정된 열 저항 값으로 1w급 LED PKG Junction temperature 를 [그림 11.]으로 계산한 결과를 [표 2.]에 나타 내었다. [A], [B] 열 저항 차이가 3.5°C/W로 Junction temperature 계산시 약 3~4°C의 차이가 나는 것을 확인 하였다.

$$T_J = T_c + [ R_{th\ j-c} * P ]$$

**$T_J$  ; PN junction temperature [ °C ]**

**$T_c$  ; Case (electrode) temperature of LED PKG [ °C ]**

**$R_{th\ j-c}$  ; Thermal resistance from  $T_J$  to case [ °C/W ]**

**$P$  ; Dissipation power of LED [ W ]**

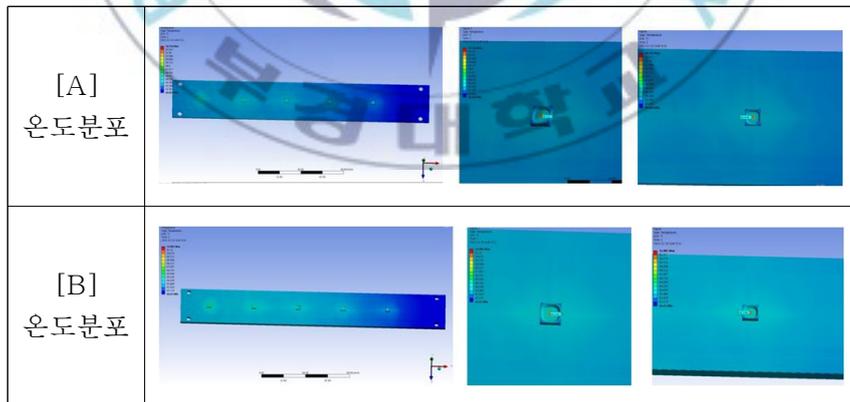
[그림 11.] Junction temperature 계산식

Die adhesive	If	Vf	P	Ta	Min. Tc	Max. Tc	Rthj-c	Min. Tj	Max. Tj
epoxy pin dotting 뿔수	[A]	[V]	[W]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C/W]	[°C]	[°C]
[A] 1	0.35	3.01	1.054	25	43.6	43.7	8.5	52.56	52.66
[B] 3	0.35	3.01	1.054		43.5	44	5	48.77	49.27
[A] 1	0.35	3.01	1.054	60	64.3	65.7	8.5	73.26	74.66
[B] 3	0.35	3.01	1.054		64.4	65.8	5	69.67	71.07
[A] 1	0.35	3.01	1.054	85	91	92.9	8.5	99.96	101.86
[B] 3	0.35	3.01	1.054		91.5	92.8	5	96.77	98.07

[표 2.] 1W LED PKG Junction temperature 변환

### 제 3절 열 시뮬레이션

본 연구에서는 1watt급 LED Package에 Ag type adhesive dotting 양에 따른 Die adhesive void 유, 무에 따른 열 저항값이 void가 있는 LED PKG에서 약 3°C/W 열 저항이 높다는 것을 확인하였다. 측정 data를 기준으로 Ansys workbench tool을 이용하여 상온(25°C)에서의 [A], [B]의 온도 분포를 분석하려 한다. 가변 인자는 Die adhesive에 공기층 유, 무에 따른 온도 분포를 simulation한 결과를 [그림 12.] 및 열전도도 값을 [표 3.]와 같이 나타내었다. Simulation 결과 실제 측정 결과와 비슷하게 Die adhesive void가 있는 [A]에서 Junction temperature가 약 3°C 더 높은 결과를 확인하였다.



[그림 12.] 온도 분포 상태 simulation

Material	열전도도(W / mm <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup> )
chip	2.4e-002
Die adhesive	0.0075
air	0.026.e-003
Cu	0.386
Aluminum	0.204
PSR	3.e-004
Silicone	1.e-003
EMC	3.e-004
Preg	2.e-003

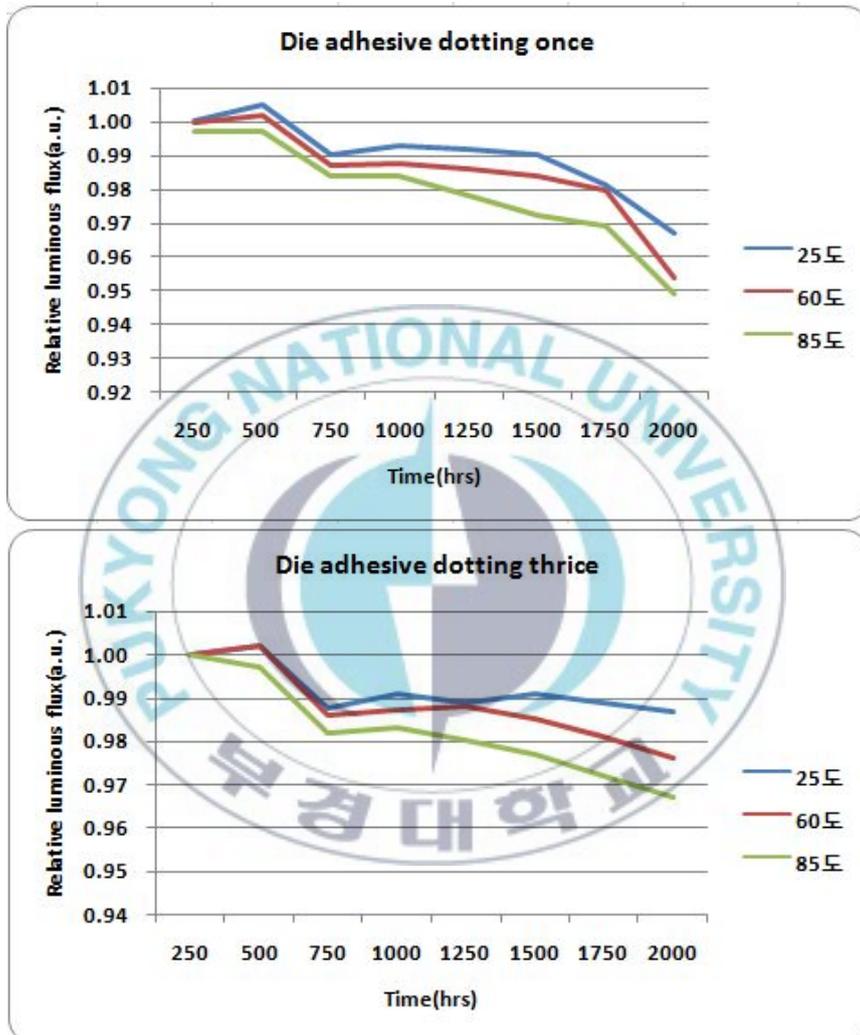
[표 3.] LED PKG material에 따른 열전도도

## 제 4절 신뢰성 측정

본 논문은 Ag접착제 양에 따른 열 저항 분석을 통해 신뢰성에 얼마나 영향을 끼치는지를 목적으로 실험 하였다. Ag 접착제 양이 다른 [A], [B] 두 LED PKG 15개를 metal PCB에 실장하여 25도, 60도, 85도 Chamber에 각각 350mA로 구동하여 2000hr 동안 250hr 주기로 신뢰성을 측정하였다. 측정 장비로는 PIMACS 업체의 1M 적분구로 전광선속의 Drop율을 측정하였다. 그 결과 그림()와 같이 접착제 양에 따른 PKG 신뢰성 결과가 다르게 나타난 것을 확인하였다. 2000hr 동안 25도에서

2%, 60도에서 2.2% 85도에서 1.8% 신뢰성 차이가 나는 것을 확인하였고 열 저항 값이 높은 [A]시료가 [B]에 비해 신뢰성 drop율이 높은 것을 확인하였다. 이는 열 저항이 높으므로 열이 잘 빠져나가지 못해 장기 신뢰성에 있어 PKG 열화 및 변색에 영향을 끼치는 것으로 생각 된다.





[그림 13.] 신뢰성 data 상[A], 하[B]

## 제 5절 수명 예측

2000hr 동안의 신뢰성 data를 통해 각각의 온도 25, 60, 85도에서의 수명을 계산해 보았다. [그림 14.]은 Lumileds - Luxeon Reliability (Application Brief RD25) 수명 계산식으로 조명에서 초기대비 광속 유지율 70%이하를 고장으로 판단한다. 2000hr 신뢰성 data로  $L_{70}$ 을 산출한 결과 [그림 14.]과 같이 각각의 구동 환경에서의 수명을 알 수 있었다. 25도 동작환경에서는 [A] 대비 [B]의 수명이 33000hr 더 좋은 신뢰성 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 60도, 85도 환경에서는 각각 14000hr, 7000hr 열 저항이 낮은 시료 [B]의 신뢰성이 더 좋다는 결과를 얻을 수 있었다.

[Life Time Calculation Equation]

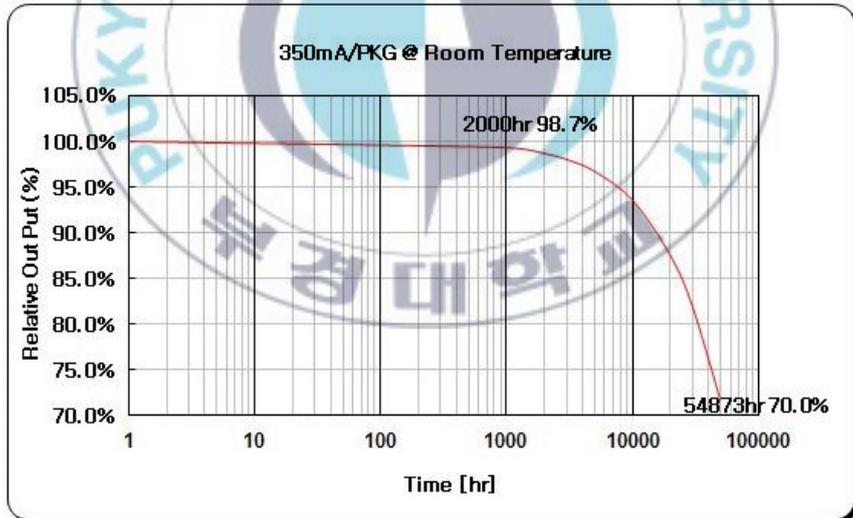
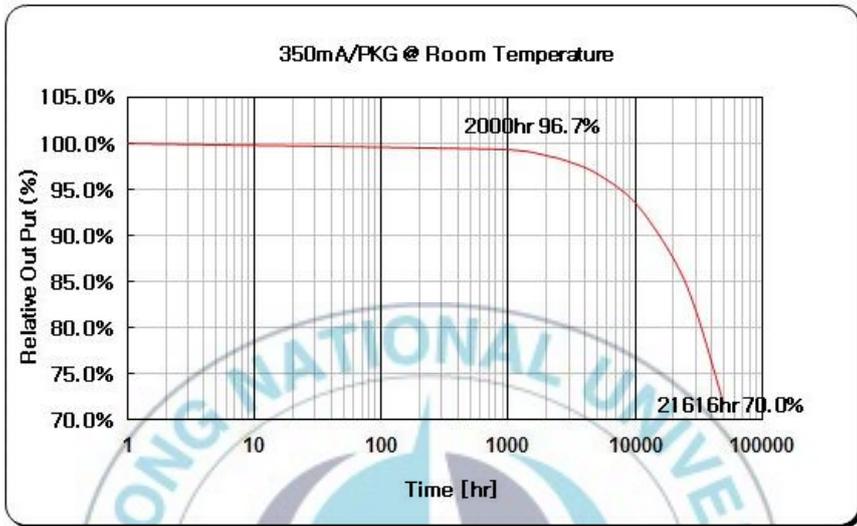
$$L = e^{(-\alpha t)}$$

$-\alpha$  : Light output degradation rate (decay constant)  
 $t$  : Operation time measured in hours  
 $L$  : Light output

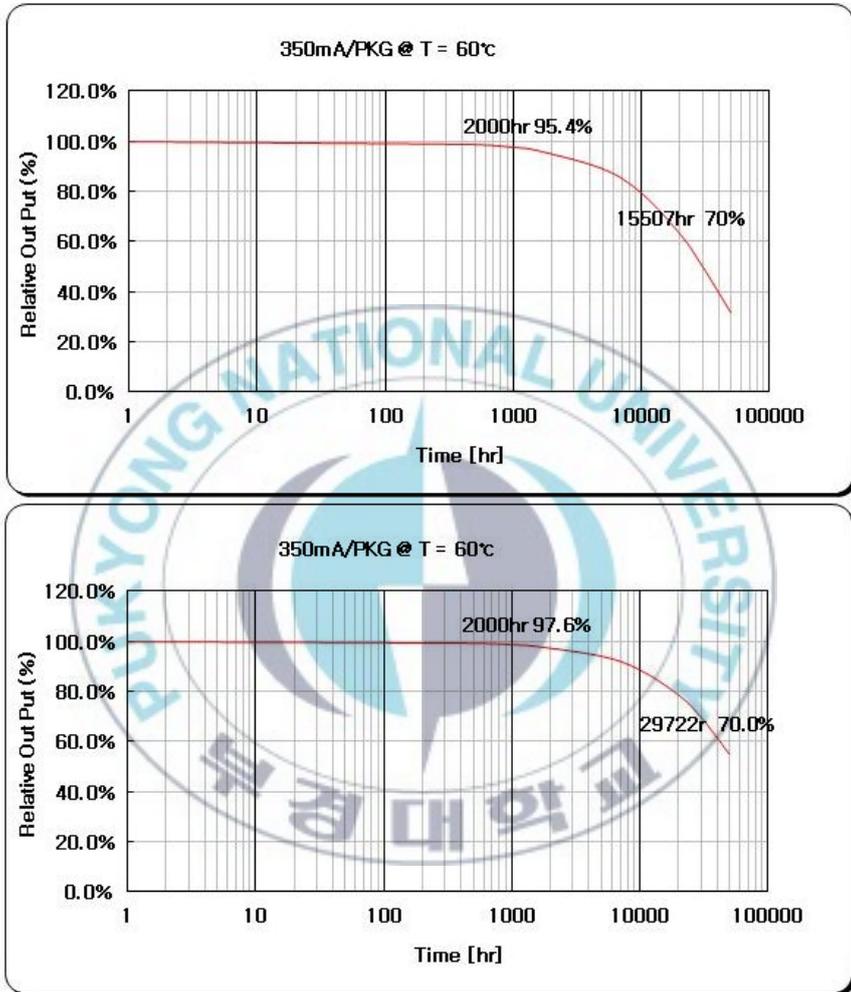
$\alpha$ (; decay constant)를 구하기 위해서는 기본적인 신뢰성 시험 data 필요

$$\alpha = \frac{\text{신뢰성 기간 동안의 광도 drop율}}{\text{신뢰성 평가 기간(시간)}}$$

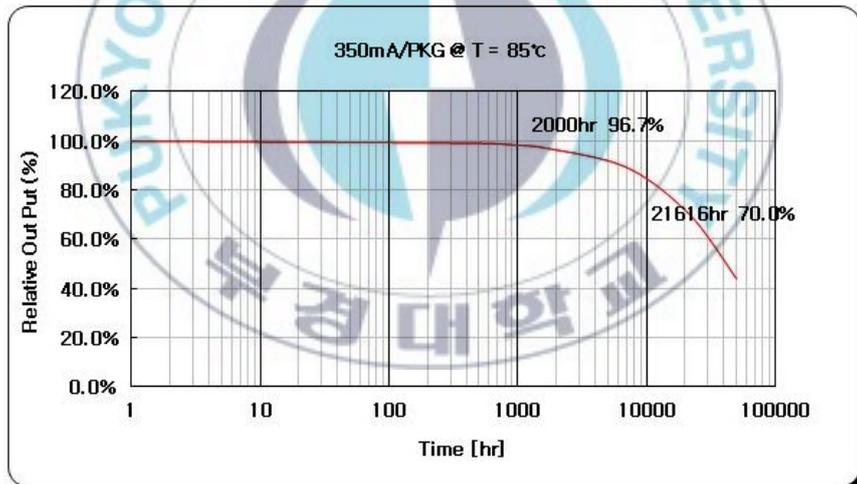
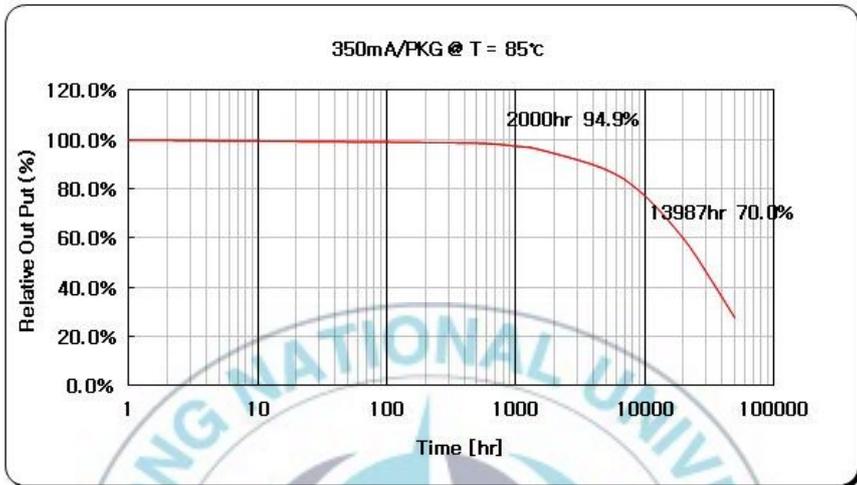
[그림 14.] Life time calculation equation



[그림 15.] 25도 수명예측



[그림 16.] 60도 수명예측



[그림 17.] 85도 수명 예측

## 제 IV 장 결 론

본 연구에서는 Die adhesive 함량에 따른 열적인 특성을 측정하여 Ag paste 양에 따른 열 저항 값이 다르다는 것을 확인 하였다. 그 원인으로서는 chip 면적에 Die adhesive가 균일하게 도포 되지 않아 void 형성으로 인한 air gap이 생겨 열 이동을 방해해 열 저항이 높아진다.

이는 곧 신뢰성에 영향을 끼치기 때문에 1w power급 PKG에서 25도, 60도, 85도 환경에서의 신뢰성이 얼마나 차이냐고 신뢰성 향상을 방안을 본 연구를 통해 다음과 같이 제시하고자 한다.

(1)LED package 소자 공정 중 Die adhesive를 Lead frame에 찍어 얹은 뒤 chip을 올리는 공정에서 Die adhesive가 chip 면적에 충분히 퍼져 있지 않은 경우와 chip 면적에 균일하게 퍼져 있는 경우 열전도율이 얼마나 차이 나는지를 확인하였다. chip 면적에 충분히 퍼져있지 않을 경우 흔히 말하는 void(air gap)가 형성되어 열 전달에 방해하는 역할을 하게 된다. Air의 열전달 계수는  $0.026\text{W/mK}$ 로 비전도체인 Si  $150\text{W/mK}$ 와 비교 했을 시에도 열전도율이 낮다는 것을 알 수 있다.

(2) Void 유, 무에 따른 열 저항 측정 결과 void(air gap)가 있는 LED package 소자의 열 저항  $8.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$  값을 확인 할 수 있었고 그렇지 않은 LED package 소자의 열 저항  $5^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 로  $3.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$  차이가 나는 것을 확인 할 수 있었다. 두 package의 열 저항을 측정하기 위해 시료 10개씩을 측정하여 평균값을 얻은 결과이다.

(3) 열 저항이  $3.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$  차이 나는 것을 확인하였다. 두 package의 25도, 60도, 85도 환경에서 LED package를 구동하였을 시 신뢰성이 얼마나 차이나는가를 확인하기 위해 metal PCB에 5개 직렬로 350mA 전류를 인가하여 1W power급 package로 구동하여 2000hr 동안 신뢰성을 비교하여 보았다.

25도 상온 동작에서는 2000hr 동안 광속 감소율이 96.7%, 98.7%로 열 저항이 높은 LED package가 그렇지 않은 package에 비해 2% 낮은 신뢰성 결과를 보였으며, 이를  $L_{70}$ 을 고장으로 봤을 때의 수명은 약 33000hr 차이난다는 결과를 얻을 수 있었다. 60도 동작에서는 95.4%, 97.6%로 2.2% 차이이며 수명식으로 계산 시 약 14000hr 차이 나는 결과를 확인 할 수 있었다. 85도도 마찬가지로 94.9%, 96.7%로 1.8% 차이이고 수명식으로 계산 결과 약 7000hr 차이나 열 저항이  $3.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$  낮은 시

료에서의 신뢰성이 좋다는 결과 확인 하였다.

본 연구를 통해 Die adhesive 토출 양을 chip면적에 균일하게 도포함으로써 열적 특성을 최적화 하고 신뢰성 향상이라는 결과를 얻을 수 있는 방향을 제시하였다. 본 논문에서 제시한 방향이 향후 1W급 이상의 LED package 및 High power COB 개발에 기여 할 수 있을 거라 생각 된다.



## 제 V 장 참고 문헌

- [1] LED 조명 신뢰성 핸드북. 일본 LED 조명 추진협의회 (2008)
- [2] AnTran, "More About Heat Transfer"
- [3] Application brief AB05(Lumiled)
- [4] 황응준, "고출력 발광다이오드 패키지의 열 분석 및 열 설계" 명지대학원 신소재공학 박사학위 논문 (2006)
- [5] Vladimir Szekely and Marta Rencz, "Thermal Dynamics and the Time Constant Domain" (2000.09.03)
- [6] 신무환, "고출력 LED를 위한 열 저항 측정 및 Packaging 설계 기술" (2004)
- [7] 배광성, "High Power LED를 위한 LTCC 패키지의 Heat-via에 따른 열특성" (2006.12)
- [8] 이태희 외 4명, "Thermal analysis of GaN-based LEDs using the finite element method and unit temperature profile approach" (2004)
- [9] C.C.Lee and D.H.Chen, "PAMICE-A program for the potential analysis of multi-layer infinite plate structures with circular embedded sources, Version1.0" (1995)
- [10] User's manual of ANSYS, "Theory of thermal

Modeling”(2001)

[11] User's manual of FLOTHERM," Introduction to version4.1Lecture Note“

[12] S. Shionoya, W. H. Yen, "Phosphor Hand Book", CRC Press, NY, USA, (1998)

[13] J. S. Kim, P. E. Jeon, J. C. Choi, H. L. Park, S. I. Mho, G. C. Kim, Appl. Phys. Lett., 84, 2931 (2004)

[14] Yukio Narukawa, Isamu Niki, Kunihiro Izuno, Motokazu Yamada, Yoshinori Murazaki, and Takashi Mukai, Jpn. J. Appl. Phys., 41, L371 (2002)

[15] Yuichi Sato, Nobuyuki Takahashi and Susumu Sato, Jpn. J. Appl. Phys., 35, L838 (1996)

[16] J. K. Park, M. A. Lim, C. H. Kim, and H. D. Park, J. T. P., S. Y. Choi, Appl. Phys., Lett. 82, 683 (2003)

## 감사의 글

2년이라는 시간동안 많은 생각과 다시 한 번 저를 돌아볼 수 있었던 시간이었습니다. 처음 대학원에 진학할 당시 언제 졸업하고 어떤 주제로 석사학위를 취득할까? 그리고 2년 후의 나의 모습은 어떨까? 라는 고민과 4년간의 학부생 시절 진로와 무엇을 하고 싶은지 취업 걱정에 하루하루 고민만 쌓여가는 저에게 대학원 진학은 새로운 길을 여는 도전이자 기회였습니다.

시간이 거짓말처럼 흘러 2년이 지난 지금 생각해보면 제 자신에게 부끄럽고 아직까지 많이 부족하다고 느껴집니다. 진학 당시의 열정과 포부는 없어지고 게을러진 제 자신을 돌이켜 보면서 다시 한번 반성하게 됩니다. ‘석사를 졸업하면 끝이다’라는 생각보단 초심의 마음으로 나에게 부족한 게 무엇이고 앞으로 더 발전해 나가기 위해 석사과정을 발판삼아 끊임없이 노력하겠습니다.

부족한 저를 가르치시고 대학원으로 이끌어 주신 김종수 교수님, 정용석 교수님께 머리 숙여 감사의 인사드립니다. 그리고 저의 논문 심사를 맡아 아낌없는 조언과 가르침을 주신 김종태 교수님, 정용석 교수님과 이미지시스템공학과에서 다양한 전공지식을 가르쳐 주신 임권택 교수님, 정연태 교수님, 김지홍 교수님, 허훈 교수님, 오정수 교수님, 조병권 교수님께도 감사의 인사드립니다. 연구실에서 고생하는 선배님, 후배들에게도 고맙고 감사하다는 말을 전하고

싶습니다.

친구란 오래 두고 가깝게 사귄 벗입니다. 그런 친구들 개코, 토끼, 똥, 제년, 초딩, 바우, 맹구, 태콩에게 힘들 때 서로 힘이 되어 주고 곁에 있는 친구가 있어 고맙다. 특히 똥 고맙다이 ㅎㅎ

항상 내편이자 응원해주는 여자친구 황진혜에게도 고맙고 3년 뒤에 내가 한말 잊지 않고 기억해주고 나의 바람대로 꼭 이루어 졌으면 좋겠다^^ 항상 고맙고 사랑해^^

끝으로 사랑하는 우리 가족 아버지, 어머니, 형 그리고 귀여운 카니에게 표현은 잘 못했지만 정말 사랑하고 고맙다는 말을 글로나마 전합니다. 타지 생활에 힘들고 지친 저에게 가족은 가장 큰 힘이자 행복을 느낄 수 있는 곳이었습니다. 사랑합니다.

