

# Epoxy/Phenolic resin을 활용한 메타-아라미드 시트지와 금속 소재의 내열접착성 향상

## Improvement of Heat Resistant of Adhesion between *m*-Aramid Sheet and Metal Materials using Epoxy/Phenolic Resin

\*Corresponding author

Jaewoong Lee  
(jaewlee@yu.ac.kr)

강찬규<sup>1</sup>, 채주원<sup>2</sup>, 최승진<sup>3</sup>, 이지수<sup>4</sup>, 김삼수<sup>4</sup>, 이상오<sup>5</sup>, 이재웅<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>한경대학교 토목안전환경공학과, <sup>2</sup>스타텍스, <sup>3</sup>(주)한양에코텍 기업부설연구소, <sup>4</sup>영남대학교 파이버시스템공학과, <sup>5</sup>영남대학교 의류패션학과

Chan Gyu Kang<sup>1</sup>, Ju Won Chae<sup>2</sup>, Seung Jin Choi<sup>3</sup>, Ji Su Lee<sup>4</sup>, Sam Soo Kim<sup>4</sup>, Sang Oh Lee<sup>5</sup>, and Jaewoong Lee<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Safety Environmental Engineering, Hankyong National University, Anseong, Korea

<sup>2</sup>Startex, Gyeongsan, Korea

<sup>3</sup>HANYANG ECO TEX Co., Ltd, Research & Development Department, Chilgok, Korea

<sup>4</sup>Department of Fiber System Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

<sup>5</sup>Department of Clothing and Fashion, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea

Received\_September 01, 2022  
Revised\_September 14, 2022  
Accepted\_September 23, 2022

Textile Coloration and Finishing  
TCF 34-3/2022-09/157-164  
© 2022 The Korean Society of  
Dyers and Finishers

**Abstract** This study tried to analyze the heat resistance properties by blending epoxy and phenolic resin in a certain ratio, and to analyze the adhesive properties at the time of metal-polymer hetero-adhesion by applying Epoxy-phenolic resin between a silicon steel sheet and *m*-aramid sheet, the viscosity, adhesive peel strength, and adhesive cross section were measured using a rotational rheometer, a tensile tester(UTM), and a field emission scanning electron microscopy(FE-SEM). The thermal stability and heat resistance were confirmed by measuring the mass loss according to the temperature increase using Thermogravimetric analysis(TGA). After blending with epoxy and Phenolic resin(1:0.25 ratio) curing at 110°C for 10 min, high adhesive strength was improved more than 40% compared to the adhesive strength using epoxy alone. When the space between the silicon steel sheet and *m*-aramid sheet, which is created during curing of the E-P blend, is cured with a slight weight, it is possible to control the empty space and improve adhesion.

**Keywords** hetero-adhesion, epoxy, phenolic resin, *m*-aramid sheet, silicon steel sheet

### 1. 서 론

산업기술이 발전함에 따라 단일 재료의 단점을 극복하고자 서로 다른 재료 즉, 이종 소재를 이용하여 부품을 제작하는 연구가 많이 이루어지고 있다. 이러한 이종소재의 접합을 위해서 과거부터 bolting 또는 riveting을 이용한 기계적 체결을 많이

사용해왔으나 상대적으로 낮은 밀봉성능이 단점으로 지적되어 왔다. 이에 반해 접착제를 이용하여 이종소재를 접합할 경우 뛰어난 밀봉 효과를 가지며 추가적으로 경량화가 가능하다는 장점이 있다<sup>1)</sup>.

접착제는 금속, 비금속, 그 외 피접착제를 상호 보완적으로 결합하게 해주는 재료로, 산업적 측면에서 다양하게 적용되고 있다. 최근 금속과 비금속 간의 접착에 대한 관심이 현저히 증

가함에 따라 금속과 비금속 간의 접착제 및 피접착제의 내구성 및 형태 안정성을 향상시키는 방향으로의 연구가 더욱 주목받고 있다.

일반적으로 접착제는 재료별로 에폭시계, 우레탄계, 고무계 등으로 분류하거나, 기능에 따라 범용과 기능성 접착제로 분류하는 등 다양한 분류가 가능하다<sup>2)</sup>. 기능성 접착제로 분류된 접착제에는 에폭시수지, 페놀수지, 불포화 폴리에스터 수지 등이 있다. 이들 중 에폭시수지는 접착성 및 기계적 강도 내열성, 내화학성, 내수성, 전기 절연성이 우수하고 경화제의 선택에 따라 다양한 물성의 구현이 가능한 것으로 알려져 있다.

특히, DGEBA(Diglycidyl Ether of Bisphenol A)는 경화 속도가 빠르고 가격이 저렴하며, 우수한 반응성과 접착성, 내약품성, 내열성을 가지고 있다는 장점이 있다<sup>3)</sup>. 또한 페놀수지는 우수한 내열성 및 난연성을 가지고, 장기적으로 열적 및 기계적 안정성, 절연특성을 가진다. 이러한 페놀수지는 가격이 저렴하여 접착제, 건축자재, 섬유강화 복합재료, 단열재, 패널 등 다양한 용도로 사용되고 있다<sup>4)</sup>. 불포화 폴리에스터 수지 또한 가격이 저렴하고 기계적 물성이 좋으며 우수한 내화학성으로 산업용소재 뿐만 아니라 각종 차량 부품 및 건축용 소재 등 2차 구조재로서 그 응용 분야가 광범위하다. 이러한 특성을 가짐에도 불구하고 불포화 폴리에스터 수지는 경화 시 열 수축이 비교적 크고, 80°C 이상에서의 열 안정성이 낮은 단점을 가지고 있다<sup>5)</sup>.

한편, 절연지는 주로 전력케이블, 유입 콘덴서, 통신케이블 전선 및 전자기기의 절연 등에 사용되고, 변압기, 발전기에도 사용된다<sup>6,7)</sup>. 그 중, 모터에 적용 되어지는 절연지는 코일에서 흐르는 전류를 차단하여 모터의 코어부분과 코일 부분 사이를 절연해주는 역할을 한다. 절연지는 주로 셀룰로오스를 주원료로 하는 크래프트(Kraft)지와 다이아몬드지 그리고 최근 사용범위가 점차 확산되어가고 있는 아라미드 계열의 절연물로 원재료가 구성된 Nomex지 등 다양한 원료가 적용되어 왔다<sup>8,9)</sup>.

특히, 크래프트지는 셀룰로오스, 헤미셀룰로오스 등으로 이루어져 있으며, 그 구성성분인 셀룰로오스는 글루코스 분자들이 연결된 선형 폴리머로 온도가 200°C일 때, 글리코시드 결합이 깨지는 것으로 알려져 있다. 이렇게 셀룰로오스가 열분해되어 생기는 분해산물의 누적으로 절연유와 절연지 사이의 열적 불안정성이 증가하게 되어 최종적으로 절연지의 열화를 가속화하게 된다. 또한 다이아몬드지는 DDP(Diamond-Pattern Epoxy Coated Paper)라는 명칭으로 다이아몬드 문양 프레스보드가 개발되었다. 대용량, 고전압 정격화로의 지속적인 기술 경향으로 인해 유전적, 기계적 스트레스의 문제가 발생하였다. 이와 같은 문제점을 해결하고자 다이아몬드 문양의 수지를 코팅한 절연재료를 사용하여 코일마다의 접착강도를 기계적으로 강화시켰다<sup>8)</sup>.

최근 개발된 절연지인 Nomex지는 주원료가 메타-아라미드(*m*-aramid)이며 이러한 메타-아라미드의 상품명인 Nomex는 1960년대에 Dupont사에 의해 개발되었다. 메타-아라미드는 방향족 폴리아마이드(Aromatic polyamide)의 일종으로 절연성을 지니며, 분자구조가 매우 안정하여 상대적으로 높은 열 안정성

을 가지며 연소 시 인체에 유해한 가스가 발생하지 않는다<sup>9)</sup>. 또한 방향족 폴리아마이드를 기반으로 하는 Nomex 절연지는 가장 중요한 전기 절연재 중 하나로, 발전기, 변압기, 전자레인지, 휴대폰 Battery pack, Reactor, 자동차 Spark plug leads shield, 전선피복, Speaker voice coil 등에 적용되고 있다<sup>10)</sup>.

규소강판(Silicon steel sheet)은 금속 소재의 일종으로 무방향성 전기강판으로 회전기나 전동기용으로 주로 사용되어왔다. 규소강판은 탄소, 망간, 유황분이 적정 수준으로 유지되고 보통 0.5~5%의 규소를 첨가하여 제조하며, 특별한 목적으로 6% 정도를 첨가한 규소강판이 있지만 대부분 4.5% 이상의 규소를 함유하는 규소강판은 공업적으로 생산되지 않고 있다<sup>11)</sup>.

본 연구에서는 우수한 접착성과 내열성을 가지는 에폭시수지와 내열성 및 절연특성을 가지는 페놀수지를 일정한 비율로 혼합 및 적용하여 그 내열특성을 확인하고, 특히 모터에 사용되는 규소강판과 메타-아라미드 시트지 사이에 적용하여 그 접착특성을 확인하고자 한다.

구체적으로 에폭시에 첨가되는 페놀 함량이 점성에 영향을 주는 것을 확인하기 위하여 회전성 유변물성 측정기(Rheometer)를 사용하였으며, 페놀 수지 함량 변화에 따른 접착력을 확인하기 위하여 인장시험기를 통해 시트지와 강판의 박리 최대하중을 측정하였다. 또한 전자주사현미경(SEM)을 사용하여 접착제가 적용된 단면 특성을 확인하고 경화 시 압력 유무에 따른 차이를 확인하였다. 아울러 에폭시와 페놀수지의 함량 변화에 따른 복합수지의 열 안정성 및 내열성을 확인하기 위해 열중량 분석기(TGA)를 이용하여 온도상승에 따른 질량감소를 측정하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료 및 시약

실험에 사용한 메타-아라미드 시트지는 국일제지(KUKIL PAPER MFG Co., Ltd., Korea)에서 제공 받은 시트지를 사용하였으며, 에폭시는 다관능성 에폭시(DGEBA, YD-128M, KUKDO Chemical CO., LTD., Korea)를 구매하여 추가 정제 없이 사용하였다. 페놀수지(KR-80, TAEYANG Chemical CO., LTD., Korea) 또한 구매하여 사용하였으며, 규소 강판은 (주)경창(KYUNG CHANG INDUSTRIAL Co., Ltd., Korea)에서 제공 받아 사용하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1 Epoxy-Phenolic resin 혼합수지 제조방법

메타-아라미드 시트지와 규소강판을 접착하기 위해서 메타-아라미드 시트지에 Epoxy와 Phenolic resin 비율을 각각 1:0.25, 1:0.5, 1:0.75(wt:wt)로 하여 Epoxy-Phenolic resin 혼합물(E-P blend)을 제조하였다.

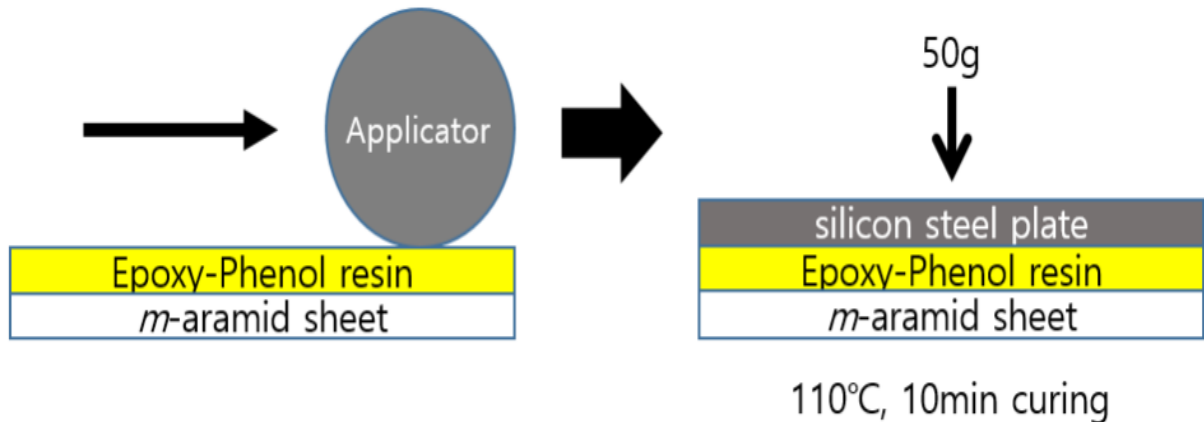


Figure 1. Preparation process of *m*-aramid sheet/Epoxy and Phenolic resin blend/silicon steel sheet sample.

## 2.2.2 메타-아라미드 시트지/E-P blend/규소강판 접착 테스트

메타-아라미드 시트지 상단에 E-P blend를 도포 후, 규소강판을 합성수지를 도포한 시트지에 부착하였다. 부착 후, 50g 추를 올려놓은 채로 경화를 진행하였다. 이때 경화온도 및 시간 조건을 110°C에서 10min으로 설정하여 경화하였다.

## 2.3 분석

### 2.3.1 회전형 유변물성 측정기(Rotational rheometer)

에폭시에 혼합된 페놀수지의 함량에 따른 점도 변화를 관찰하기 위해 Rotational Rheometer(Anton paar, MCR 301, Austria)를 사용하여 점성 거동을 측정하였으며, 25°C에서 Share rate 100[1/s]에서 600[1/s]까지 설정하였다.

### 2.3.2 전계방사형 주사전자현미경(SEM) 및 광학현미경

합성수지가 적용된 시트지의 코팅층 관측 및 두께의 측정과 혼합액이 적용된 강판 및 시트지의 단면을 확인하기 위해 FE-SEM(S-4800, HITACHI, LTD., Japan)를 사용하여 메타-아라미드 시트지의 합성수지 처리 전·후 단면을 측정하였다.

### 2.3.3 열중량 분석기(TGA)

혼합된 수지의 열분해온도를 측정하기 위하여 TG-DTA(SDT Q600, TA Instruments, USA)를 사용하여 질소 분위기에서 승온 속도 10°C/min로 800°C까지 설정하여 측정하였다.

### 2.3.4 푸리에 변환 적외선 분광기(FT-IR)

혼합된 수지의 합성 메커니즘을 파악하기 위하여 FT-IR

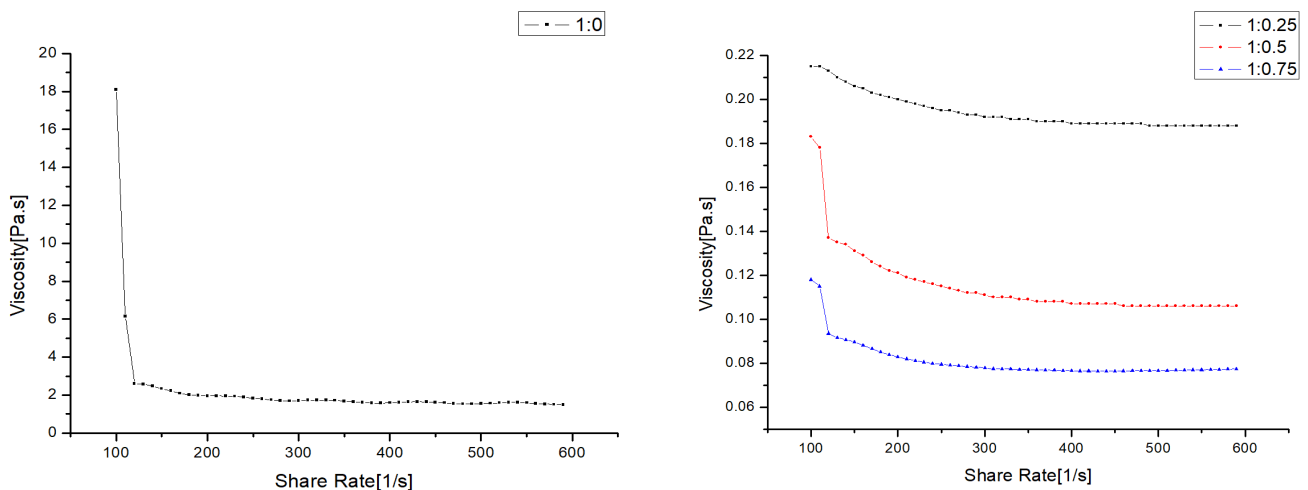
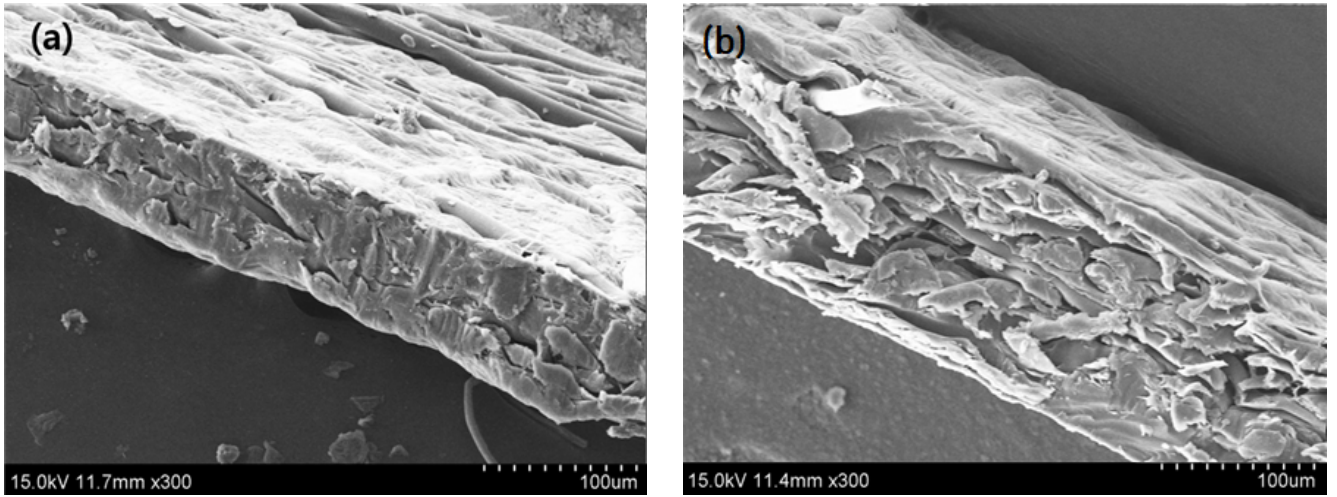


Figure 2. Viscosity of Epoxy and Phenolic resin blend.



**Figure 3.** Cross-section of *m*-aramid sheet applied Epoxy and Phenolic resin blend; (a) untreated *m*-aramid sheet and (b) *m*-aramid sheet treated with Epoxy and Phenolic resin blend.

(Spectrum100, PerkinElmer Inc., USA)를 사용하여 에폭시, 페놀수지, 에폭시-페놀합성수지를 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 에폭시-페놀수지(E-P blend)의 경화 테스트, 표면 및 단면 특성

E-P blend를 적용한 메타-아라미드 시트지/규소강판 복합체를 제조하기 전에, 회전성 유변물성 측정기를 통하여 E-P blend의 점도를 측정하고 각 조건별 점도를 Figure 2에 나타내었다.

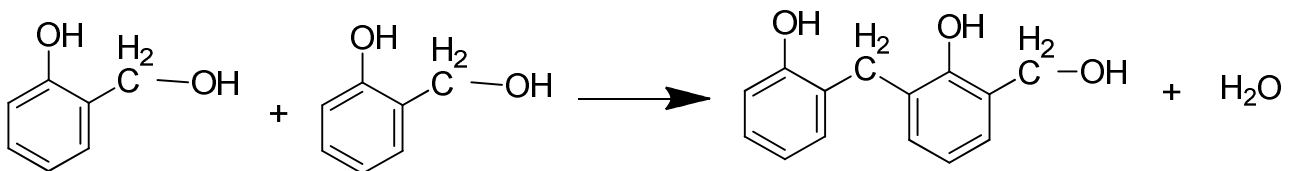
Figure 2에서 알 수 있듯이, 페놀수지 함량이 높아질수록 점성이 감소하는 경향을 보이며, 특히 1:0.25 비율과 1:0.5 비율을 비교하였을 때, 큰 폭으로 점성이 감소하며 그 이후 감소폭이 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 Figure 2에는 표현되지 않았으나, 본 연구에 사용된 페놀수지가 에폭시수지 대비 상대적으로 현저히 낮은 점성을 가지며 이러한 낮은 점성의 페놀수지

의 함량이 증가할수록 E-P blend의 점성이 낮아지는 것으로 여겨진다.

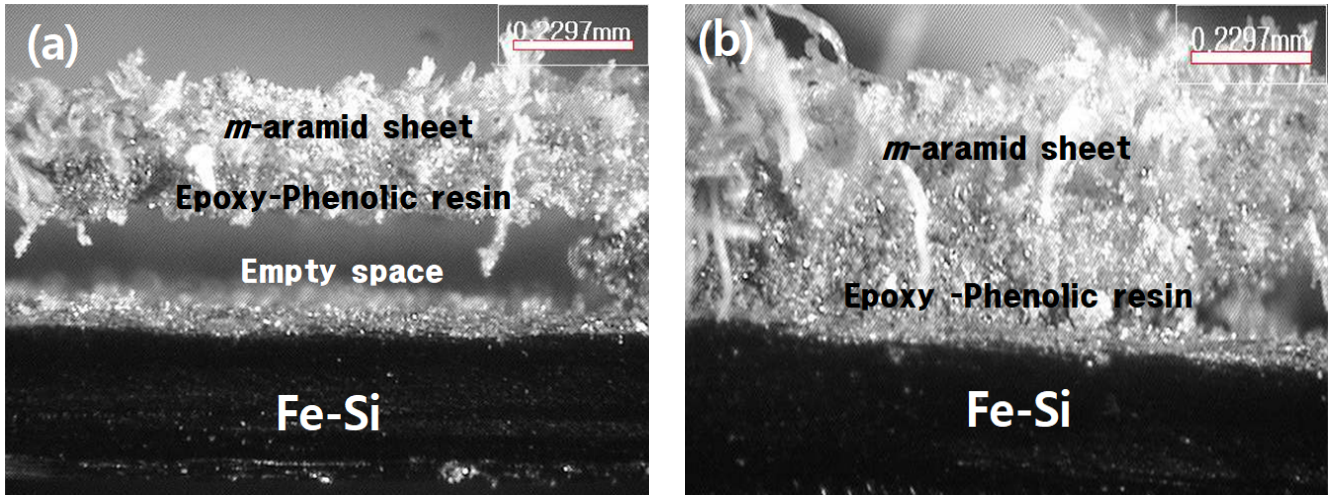
E-P blend 적용 후 메타-아라미드 시트지의 표면을 관찰하기 위하여 미처리 메타-아라미드 시트지와 E-P blend를 적용한 메타-아라미드 시트지의 단면을 SEM으로 분석한 후 그 이미지를 Figure 3에 나타내었다.

Figure 3를 살펴보면 미처리 메타-아라미드 시트지(Figure 3 (a))의 상단면에서는 관찰되지 않는 코팅층이 E-P blend 처리 메타-아라미드 시트지의 상단면에서는 확인되었다. 또한 E-P blend로 추정되는 층이 메타-아라미드 시트지 내부로의 침투는 제한적이며 사실상 표면에 도포되어 있음을 알 수 있었다.

E-P blend를 적용한 메타-아라미드 시트지와 규소강판의 접착 특성을 확인하기 위해 E-P blend 처리후 메타-아라미드 시트지와 규소강판의 단면을 관찰하여 Figure 5에 나타내었다. E-P blend 처리 후 200°C에서 경화할 경우, 메타-아라미드 시트지 표면과 규소강판 표면 사이에 빈 공간(Empty space)이 발생함을 확인하였다(Figure 5(a)). 이러한 빈 공간은 경화 과정에서 발생한 것으로 추정된다. 실제 E-P blend의 한 성분인 Phenolic resin의 경우 Figure 4에서 알 수 있듯이, 페놀과



**Figure 4.** Reaction of methylol phenol<sup>13)</sup>.



**Figure 5.** Cross-section of *m*-aramid sheet applied Epoxy and Phenolic resin blend; (a) curing at 200°C without pressure and (b) curing at 200°C with pressure.

포름알데히드를 합성하여 제조한 수지로서, 페놀과 포름알데히드는 축합반응으로 메틸을 페놀을 생성하고 메틸을 페놀 간 반응 시 벤젠 고리 사이에 -CH<sub>2</sub>- 결합이 생성되면서 H<sub>2</sub>O가 배출된다. 즉, 페놀수지의 열처리로 인해 경화가 진행될 경우, 급격한 축합 반응이 발생하여 H<sub>2</sub>O에 의한 기포가 생성되는 것으로 추정되는데<sup>12,13)</sup> 이러한 기포에 의해 메타-아라미드 시트지와 규소강판 사이에 빈 공간이 발생한 것으로 여겨진다.

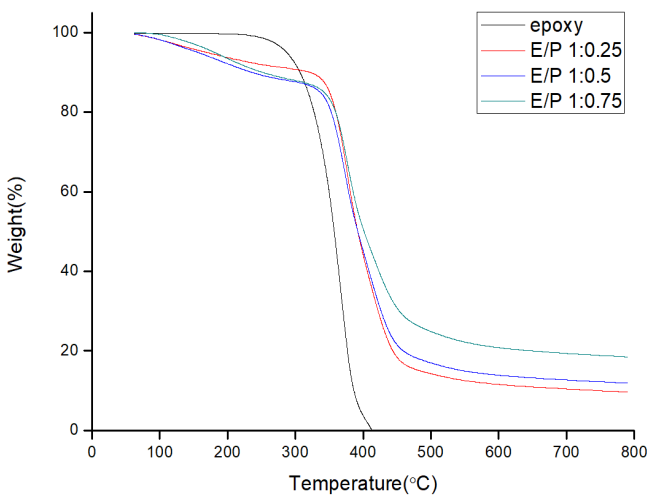
경화 시 발생하는 메타-아라미드 시트지와 규소강판 사이의 빈 공간을 제어하기 위해 50g 추를 올려놓아 압력을 가해 경화하고 그 단면을 Figure 5(b)에 나타내었다. Figure 5(b)를 통

해 알 수 있듯이, 고열의 경화 조건에서도 소량의 압력을 가하면 내부 비어있는 공간을 제어할 수 있음을 확인하였다.

### 3.2 Phenolic resin 함량에 따른 E-P blend의 열적 특성

E-P blend의 내열특성을 확인하기 위해 열중량 분석기(TGA)로 초기분해온도를 측정하여 Figure 6 및 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 알 수 있듯이, 단일 에폭시수지와 단일 페놀수지보다 E-P blend의 초기분해온도가 약 50°C에서 75°C가량 상승한 것으로 나타났다. 이를 통하여 에폭시수지에 페놀수지를 합성함으로써 합성수지 자체의 내열특성이 증가한 것을 확인하였다.



**Figure 6.** Thermal characterization of Epoxy and Phenolic resin blend.

**Table 1.** Thermal characterization of Epoxy and Phenolic resin blend

	T (10wt%)	Char yield (800°C, N <sub>2</sub> )
Epoxy	309.79°C	-
E-P 1:0.25	321.25°C	9.648%
E-P 1:0.5	237.88°C	11.95%
E-P 1:0.75	242.75°C	18.47%

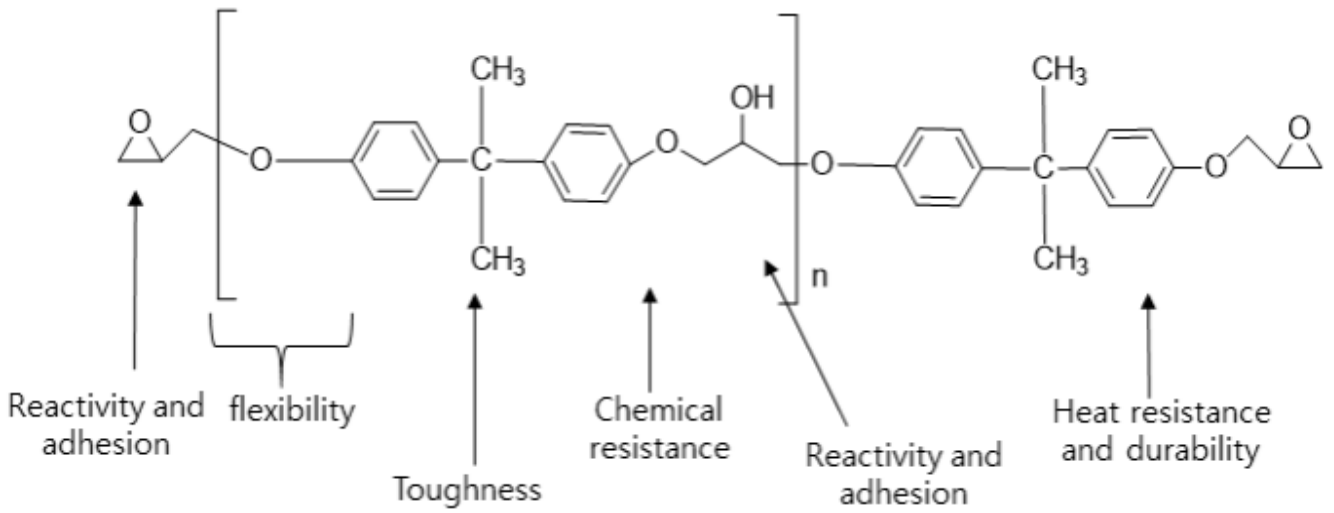


Figure 7. Chemical structure and key features of DGEBA<sup>14,15</sup>.

### 3.3 메타-아라미드 시트지/Epoxy-Phenolic resin 합성 수지/규소강판의 화학적 구조 및 접착 매커니즘

본 실험에서 사용한 에폭시수지는 2,2-bis(4'-glycidylphenoxy)propane으로 DGEBA로 불린다.

DGEBA의 화학적 구성을 Figure 7에 나타내었다<sup>14,15</sup>. 또한 에폭시 수지, 페놀 수지, E-P blend의 FT-IR을 측정하여 Figure 8에 나타내었다.

E-P blend의 FT-IR Spectroscopy를 확인하였을 때, 에폭시 시그널(914cm<sup>-1</sup>)의 peak가 사라지고, 지방성 에테르기(1106 cm<sup>-1</sup>)의 peak가 생성되었음을 확인할 수 있다.

각 수지 단량체의 반응 부분과 Figure의 FT-IR 결과를 미루

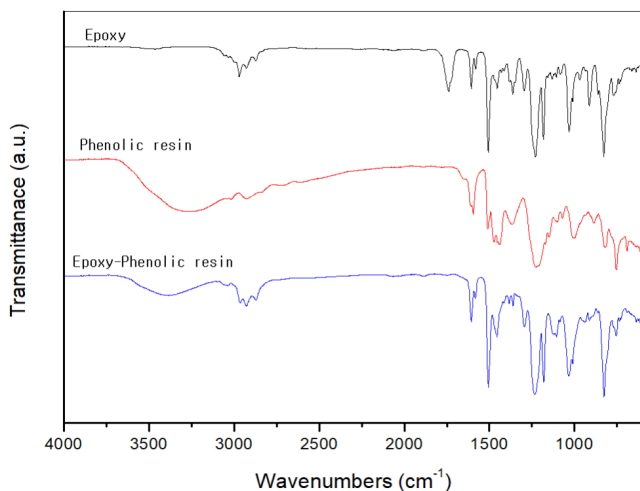


Figure 8. FT-IR Spectroscopy of Epoxy, Phenolic resin and Epoxy-Phenolic resin.

어 보았을 때, Figure 9로 합성이 이루어질 것으로 추정된다<sup>16,17</sup>.

Figure 9과 같이 에폭사이드 고리와 메틸올 페놀의 -OH기 간에 결합이 일어날 것으로 추정된다. 또한 E-P blend와 메타-아라미드 시트지 간의 접착은 메타-아라미드의 말단에 위치한 아민기(-NH<sub>2</sub>)와 에폭시수지의 에폭시 링 사이의 개환반응에 의해 결합될 것으로 여겨지며, 메타-아라미드의 일부 아민기가 페놀수지의 메틸올의 메틸과 반응하여 접착력이 생성될 것으로 추정된다<sup>18,19</sup>.

규소강판은 Fe-Si로 실리콘 1~5%와 철로 이루어져 있으며, 대부분의 규소강판은 실리콘 3% 정도를 함유한다<sup>20</sup>. 또한 앞서 살펴본대로, E-P blend는 에폭시수지 대비 점도가 감소하여 규소강판의 미세한 요철 부분까지 복합수지가 침투하여 접착 면적을 넓혀 접착력이 상승할 것으로 추정된다<sup>21</sup>.

### 3.4 메타-아라미드 시트지/Epoxy-Phenolic resin/규소강판 접착

제조한 E-P blend를 메타-아라미드 시트지 위에 Applicator를 이용해 도포 후 규소강판에 부착하였다. 일정한 열을 가하여 복합체를 제조한 후 그 복합체를 인장 시험기를 통하여 박리하였으며, 박리 시 평균 최대하중을 Figure 10에 나타내었다.

Figure 10에서 알 수 있듯이, E-P blend의 경우 특정 비율(E:P=1:0.25)에서 Epoxy 단독 적용대비, 40% 정도의 접착력 향상을 보였다. 하지만 E:P=1:0.25을 초과하여 Phenolic resin이 첨가될 경우 그 접착 강도가 최대치 대비 오히려 감소하는 경향이 나타남을 확인하였다.

이를 근거로 볼 때, Epoxy 기반의 접착제에 Phenolic resin의 혼합은 특정비율까지는 접착력이 증가하지만, 일정 비율 이상 페놀수지 비중이 증가하더라도 결과적으로 메타-아라미드와 규소강판의 접착력 향상을 크게 향상시키지 않는다는 것을 알 수 있었다.

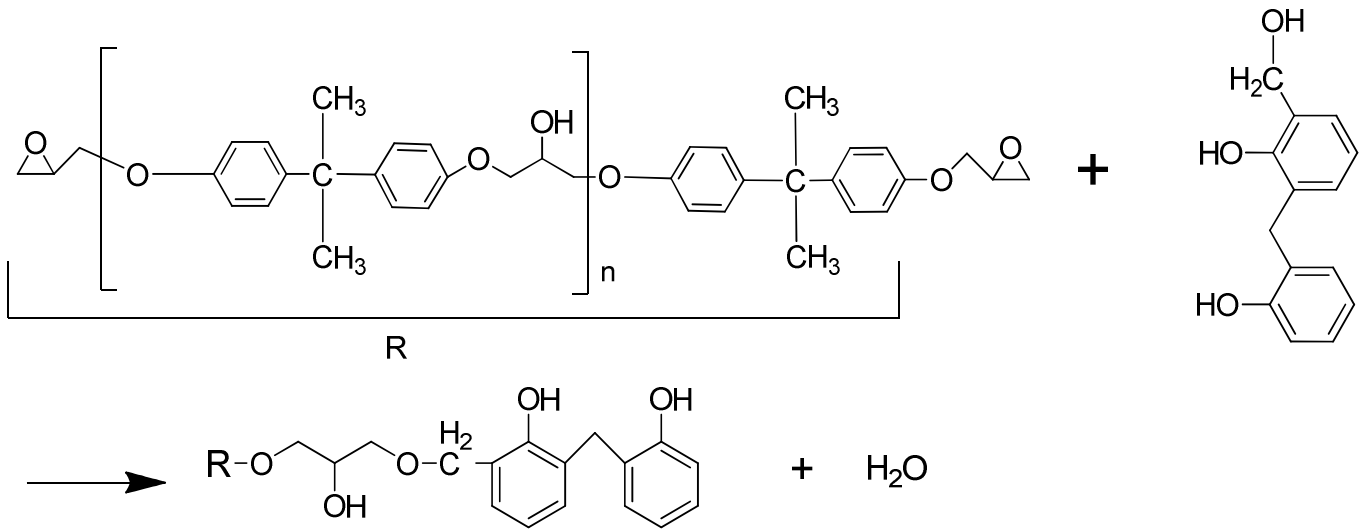


Figure 9. Reaction of Epoxy-Phenolic resins.

#### 4. 결 론

에폭시수지와 페놀수지를 선택하여 E-P blend를 제조하고 메타-아라미드 시트지와 규소강판 간의 접착을 시도하였으며 에폭시수지에 혼합되는 페놀수지의 함량을 변화시켜 그 내열특성과 접착특성을 확인하였다. Rheometer를 사용하여 페놀수지 함량이 높아질수록 E-P blend의 점성이 감소하는 경향과 1:0.25 비율과 1:0.5 비율을 비교하였을 때, 큰 폭으로 점성이 감소하며 그 이후 감소폭이 줄어드는 것을 확인하였다.

결과적으로 에폭시수지:페놀수지=1:0.25 비율로 혼합 후, 110°C, 10 min로 경화시킨 조건에서 에폭시수지 단독 사용 후

나타난 접착력에 비해 40% 정도 향상된 높은 접착력이 나타나는 것을 확인하였다.

다만, 에폭시수지:페놀수지=1:0.25보다 페놀수지의 비중을 높일 경우, 그 접착력은 오히려 감소함을 확인할 수 있었다. E-P blend 적용 후 메타-아라미드 시트지의 단면을 SEM으로 분석한 결과, 미처리 메타-아라미드 시트지의 상단면에서는 관찰되지 않는 코팅층이 E-P blend 처리 메타-아라미드 시트지의 상단면에서는 확인되었다. 또한 E-P blend로 추정되는 층이 메타-아라미드 시트지 내부로의 침투는 제한적이며 사실상 표면에도포되어 있음을 확인하였다.

E-P blend의 경화 시 에폭시와 페놀수지 간 축합반응으로 내부 기포가 발생하여 규소강판과 메타-아라미드 시트지 사이

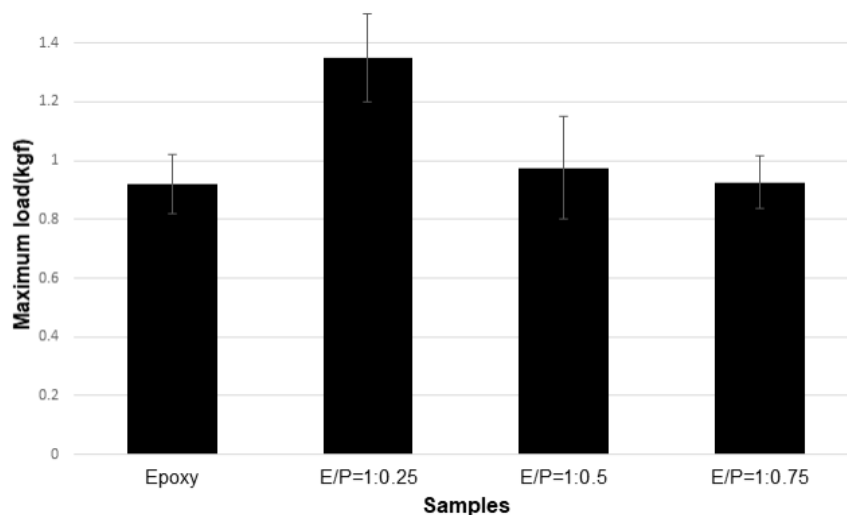


Figure 10. Average maximum load with *m*-aramid sheet/Epoxy-Phenolic resin/silicon steel plate.

에 빈 공간이 발생하였다. 약간의 하중을 가한 상태로 경화 시, 빈 공간의 제어가 가능함을 확인하였다. E-P blend의 내열특성을 확인하기 위해 열중량 분석기(TGA)로 초기분해온도를 측정하여 단일 에폭시수지와 단일 페놀수지보다 E-P blend의 초기분해온도가 약 50°C에서 75°C가량 상승한 것을 관측할 수 있었다.

본 연구를 통해 메타-아라미드와 규소강판의 이종 소재 간 접착에 적용 가능한 E-P blend의 조건을 확립하였으며, E-P blend의 적용에 의한 메타-아라미드 시트지와 규소강판의 접착 메커니즘을 제시하였다. 이러한 연구내용은 향후 Epoxy와 Phenolic resin의 복합 적용 및 접착 관련 분야에 긍정적으로 기여할 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 20011293, 고내열(200도 이상) 전기절연지 및 전기자동차용 구동 모터 개발).

## References

1. J. H. Jung, A Study on the Adhesion Enhancement of Dissimilar Materials through Laser Surface Treatment, M.S. Thesis, Jeonbuk National University, 2022.
2. G. U. Bae, "A Study on the Establishment of Basis for Hybrid Steel-Timber Structure System", Korea Institute of Construction Technology, Incheon, pp.102-110, 2013.
3. H. Q. Pham and M. J. Marks, "Ullmann Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley-VCH, Weinheim, pp.161-164, 2000.
4. T. Takeichi and N. Furukawa, Epoxy Resins and Phenol-Formaldehyde Resins, *Polymer Science: A Comprehensive Reference*, **10**(5), 723(2012).
5. J. M. Lee and D. H. Cho, Cure Behavior, Thermal Stability and Flexural Properties of Unsaturated Polyester/Vinyl Ester Blends, *Polymer(Korea)*, **27**(2), 120(2003).
6. G. Y. Kim, Application Status of Insulating Paper, *The Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers*, **6**(6), 491(1993).
7. <https://www.dupont.co.kr/electrical-insulation/generators.html>, 2022.08.18.
8. C. B. Park, A Study on the Life Prolongation of Pad Mounted Transformer through Improvement of Heat Radiation, M.S. Thesis, Chungnam National University, 2008.
9. M. S. Son, A Study on the Electrical Characteristics of Insulating Materials for Transformers, M.S. Thesis, Yonsei Graduate School of Engineering, 2002.
10. Y. S. Gang, S. D. Ji, T. W. Son, Y. S. Jeong, and S. H. Yun, Meta Aramid Paper, *Fiber Technology and Industry*, **15**(1), 1(2011).
11. T. H. Lee, Study of Relationships between the Manufacturing Process and Texture in Non-oriented Electrical Steels, M.S. Thesis, Kumoh National Institute of Technology, 2008.
12. M. Gilbert, "Brydson's Plastics Materials (Eighth Edition)", Butterworth-Heinemann, Oxford, pp.705-742, 2017.
13. <https://www.plenco.com/Phenolicresinic-novolac-resol-resins.htm>, 2022.08.15.
14. C. Chen, B. Li, M. Kanari, and D. Lu, "Adhesives and Adhesive Joints in Industry Applications", IntechOpen, London, pp.37-46, 2019.
15. C. H. Kim, D. Y. Ha, Y. H. Lee, D. J. Lee, and H. D. Kim, Preparation and Properties of Flame Retardant Epoxy Resins Containing Phosphorous/Silicone Components, *Clean Technology*, **23**(4), 378(2017).
16. H. A. Chun, S. Y. Park, S. J. Park, and Y. J. Kim, Preparation of Low-CTE Composite using New Alkoxy silyl-functionalized BisPhenol a Novolac Epoxy Resin and its CTE Enhancement Mechanism, *Polymer*, **207**, 122916(2020).
17. M. G. González, J. C. Cabanelas, and J. Baselga, "Infrared Spectroscopy-Materials Science, Engineering and Technology", IntechOpen, London, pp.261-284, 2012.
18. H. J. Oh and S. S. Kim, The Effect of the Core-shell Structured Meta-aramid/Epoxy Nanofiber Mats on Interfacial Bonding Strength with an Epoxy Adhesive in Cryogenic Environments, *Composites Research*, **26**(2), 129(2013).
19. S. Morsch, S. Lyon, S. D. Smith, and S. R. Gibbon, Mapping Water Uptake in an Epoxy-phenolic Coating, *Progress in Organic Coatings*, **86**, 173(2015).
20. R. Idczak, Comparison of the Oxidation Process in Pure Iron and Diluted Fe-Si Alloys: A Transmission Mössbauer Spectroscopy Study, *Oxidation of Metals*, **87**, 75(2017).
21. M. Nakazawa, Mechanism of Adhesion of Epoxy Resin to Steel Surface; Tekko Hhyomen to Epoxy Jushino Secchaku Mechanism, *Nippon Steel Technical Report*, **63**, 16(1994).

## Authors

- 강찬규** 한경대학교 토목안전환경공학과 교수  
**채주원** 스타텍스 연구원  
**최승진** (주)한양에코텍 기업부설연구소 전임연구원  
**이지수** 영남대학교 파이버시스템공학과 연구원  
**김삼수** 영남대학교 파이버시스템공학과 교수  
**이상오** 영남대학교 의류패션학과 교수  
**이재웅** 영남대학교 파이버시스템공학과 교수