

## DU-도전학기 결과보고서

<b>성 명</b>		<b>학 번</b>	
<b>단과대학</b>		<b>학과(전공)</b>	
<b>도전학기 과제명</b>	열전도성 입자가 고분자 복합체의 열전도도 및 기계적 물성에 미치는 영향 연구 Effect of thermal conductive particles on thermal conductivity and mechanical properties of thermal conductive polymeric composites		
<b>지도교수 의견</b>	DU-도전학기 주제는 열전도성 입자가 고분자의 열전도도 및 기계적 물성에 미치는 영향에 대한 고찰이다. 그래파이트 입자 크기 및 형상이 서로 다른 4종(그래파이트 및 140 $\mu$ m, 50 $\mu$ m, 8 $\mu$ m 크기의 팽창 그래파이트) 열전도성 입자를 적용한 실리콘 복합체를 합성하였으며, 열전도성 입자의 함량 및 크기가 증가함에 따라 실리콘 복합체의 열전도성 및 기계적 강도 증가 현상 관찰 및 상관관계를 실험적으로 잘 구현하였다.		

### 1. 도전 과제의 목표

- 다양한 열전도성 입자 (그래파이트, 팽창 그래파이트(140 $\mu$ m, 50 $\mu$ m, 8 $\mu$ m)) 들을 이용하여 열전도 고분자 복합체의 합성 및 적용된 열전도성 입자가 열전도성 고분자 복합체의 열전도도 및 기계적 물성에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.
- 고분자공학(1),(2)에서 이론적으로 배웠던 고분자의 기계적 성질 및 기타 물리적 성질과 각 중합공정의 장단점 등을 실질적인 실험을 통해 경험하여 견해를 높이고자 한다.
- 최종 실험결과들을 요약하여 2019년 7월 23일~26일간 중국에서 개최되는 The 23th International Symposium on Advanced Display Material and Devices에 발표하는 것을 목표로 한다.

### 2. 도전 과제 내용

#### 1) Sample 제작

- 구입한 나노 입자들을 8시간 동안 진공오븐에 건조시킨다.
- 각각의 입자들을 1wt%, 3wt%, 5wt%, 10wt%, 20wt%, 등의 다른 비율로 formulation을 계산하여 mixing machine을 이용하여 silicon 및 hardner와 섞는다.

Graphite (Weight g)			
EXP. No	Silicon	hardener	Graphite
Base	15	1.5	-
1 wt%	14.8	1.4	0.16
3 wt%	14.5	1.4	0.48
5 wt%	14.2	1.4	0.8
10 wt%	13.5	1.3	1.6
20 wt%	12	1.2	3.2

Table. 1 silicon/graphite composite formulation

Expanded Graphite 140 $\mu$ m (Weight g)			
EXP. No	Silicon	hardener	Graphite
Base	15	1.5	-
1 wt%	14.8	1.4	0.16
3 wt%	14.5	1.4	0.48
5 wt%	14.2	1.4	0.8
10 wt%	13.5	1.3	1.6
20 wt%	12	1.2	3.2

Table. 2 silicon/E.G 140  $\mu$ m composite formulation

Expanded Graphite 50 $\mu$ m (Weight g)			
EXP. No	Silicon	hardener	Graphite
Base	15	1.5	-
1 wt%	14.8	1.4	0.16
3 wt%	14.5	1.4	0.48
5 wt%	14.2	1.4	0.8
10 wt%	13.5	1.3	1.6
20 wt%	12	1.2	3.2

Table. 3 silicon/E.G 50  $\mu$ m composite formulation

Expanded Graphite 8 $\mu$ m (Weight g)			
EXP. No	Silicon	hardener	Graphite
Base	15	1.5	-
1 wt%	14.8	1.4	0.16
3 wt%	14.5	1.4	0.48
5 wt%	14.2	1.4	0.8
10 wt%	13.5	1.3	1.6
20 wt%	12	1.2	3.2

Table. 4 silicon/E.G 8  $\mu$ m composite formulation

- 위의 sample을 형틀에 넣고 60°C 오븐에 3일동안 경화시킨다.
- 경화된 복합재를 꺼낸다.



\*Particle : Graphite or Expanded Graphite (140 $\mu$ m, 50 $\mu$ m, 8 $\mu$ m)

\*Mixing conditions

Mix: 2000rpm for 1min

Defoam: 2200rpm for 1min

Fig. 1 용매를 사용하지 않은 bulk 중합과정 모식도



Fig. 2 용매를 사용하지 않은 bulk 중합과정

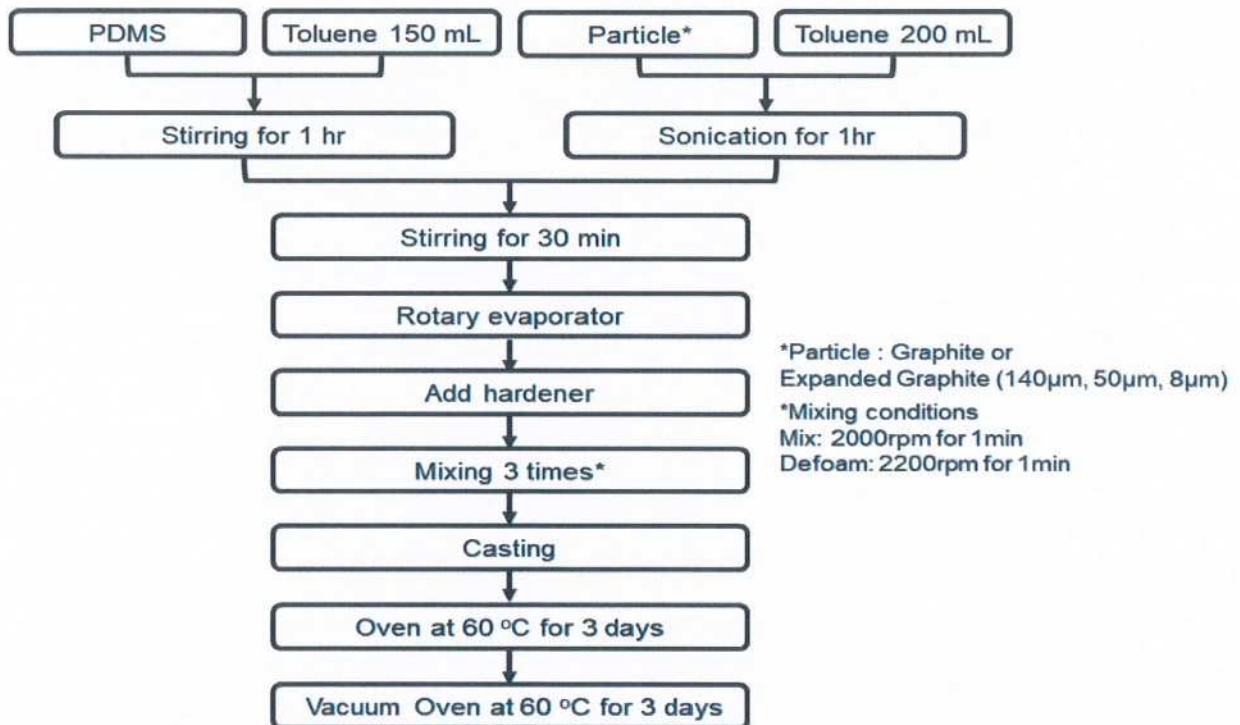


Fig. 3 용매를 사용한 용액중합과정 모식도



Fig. 4 용매를 사용한 용액중합과정

2) 완성된 sample의 평가

- 대구대학교 고분자공학 실험실에 있는 열전도도 측정기(THB-1)를 이용하여 복합체의 열전도성 평가.
- 대구대학교 중앙기기에 있는 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용하여 복합체의 표면을 찍어 나노 입자의 분산정도 확인.
- 대구대학교 고분자공학 실험실에 있는 UTM장비(Universal Test Machine)를 이용하여 복합체의 기계적 특성평가.



Fig. 5 THB (열전도도 측정기)



Fig. 6 SEM (Scanning Electron Microscope)



Fig. 7 UTM (Universal Test Machine)

4) Data 해석

- 물성평가 data들을 한눈에 보기 쉽게 표와 그래프로 정리하여 예측학 결과와 비교 및 경향성 파악
- 백분율을 이용하여 효율성 파악

5) 모든 Data를 종합하여 포스터 논문 제작

### 3. 도전 과제의 성과

- 대구대학교 고분자공학 실험실에 있는 열전도도 측정기(THB-1)를 이용하여 bulk 중합법으로 제작한 복합재의 열전도성을 평가한 결과, expanded graphite 140 $\mu$ m, expanded graphite 50 $\mu$ m, expanded graphite 8 $\mu$ m, graphite 순으로 열전도도가 높은 것을 확인하였다. 위의 data를 통해, 입자의 크기가 열전도도의 증대에 큰 기여를 하는 것을 볼 수 있었으며, 입자의 함량이 증가할수록 열전도도 또한 증가하는 경향을 알 수 있다. (Fig. 13, Table. 9 참조)  
특히, 본 실험의 data에서 가장 높은 열전도도를 보이는 expanded graphite 140 $\mu$ m 입자를 10wt% 함유한 복합재의 열전도도는 0.5362W/m\*K로, 그 전단계인 expanded graphite 140 $\mu$ m 입자를 5wt% 함유한 복합재의 열전도도보다 65% 증가하였음을 볼 수 있다. (Table. 9 참조)
- 대구대학교 고분자공학 실험실에 있는 열전도도 측정기(THB-1)를 이용하여 solvent 중합법으로 제작한 복합재의 열전도성을 평가한 결과, expanded graphite 140 $\mu$ m, expanded graphite 50 $\mu$ m, expanded graphite 8 $\mu$ m, graphite 순으로 열전도도가 높은 것을 확인하였다. 위의 data를 통해, 입자의 크기가 열전도도의 증대에 큰 기여를 하는 것을 볼 수 있었으며, 입자의 함량이 증가할수록 열전도도 또한 증가하는 경향을 알 수 있다. (Fig. 19, Table. 14 참조)  
특히, 본 실험의 data에서 가장 높은 열전도도를 보이는 expanded graphite 140 $\mu$ m 입자를 10wt% 함유한 복합재의 열전도도는 0.7890W/m\*K로, 그 전단계인 expanded graphite 140 $\mu$ m 입자를 5wt% 함유한 복합재보다 105% 증가하였음을 볼 수 있다. (Table. 14 참조)
- 열전도성 평가 결과 일부 제외된 대부분의 복합재들이 bulk 중합법으로 제작한 복합재들보다 solvent 중합법으로 제작한 복합재들의 열전도도가 높게 나타났다. 특히, 가장 높은 열전도도를 보이던 expanded graphite 140 $\mu$ m 입자를 10wt% 함량한 복합재의 경우, solution 중합법으로 제작한 복합재의 열전도도는 bulk 중합법으로 제작한 것에 비해 47% 높아짐을 볼 수 있다. 이를 통해, 중합법이 bulk 중합법보다 입자의 분산성을 더욱 높이는데 효과적이라는 것을 추론해 낼 수 있으며, 열전도도를 높이는 방법을 찾아내려했던 실험의 목적과 결과가 서로 부합하여 실험이 성공적으로 마무리되었다.
- 대구대학교 고분자공학 실험실에 있는 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 bulk 중합법으로 제작한 복합재의 기계적 강도를 평가한 결과, 열전도성 입자의 종류와 관계없이 열전도성 입자의 함량이 증가할수록 modulus 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다. 열전도성 입자함량이 5wt%까지는 그 값이 모두 비슷하나, 열전도성 입자함량이 10wt%에서는 expanded graphite 140 $\mu$ m의 modulus가 다른 열전도성 입자들에 비해 확연히 높은 modulus를 보인다. 열전도성 입자함량이 20wt% 인 경우, expanded graphite 140 $\mu$ m, expanded graphite 50 $\mu$ m, expanded graphite 8 $\mu$ m, graphite 순으로 modulus가 큰 것을 확인할 수 있는데, 이를 바탕으로 열전도성 입자의 크기에 따라 modulus가 증가함을 알 수 있다. 본 Data를 바탕으로 열전도성 입자의 크기가 복합재의 modulus에 영향을 미친다는 것을 추론할 수 있다. (Fig. 29, Table. 19 참조)
- 대구대학교 중앙기기에 있는 SEM(Scanning Electron Microscope, 전자주사현미경)을 이용하여 열전도성 입자의 표면을 관찰한 결과, 200배의 배율로 각각의 열전도성 입자를 관찰하였을 때, expanded graphite 140 $\mu$ m, expanded graphite 50 $\mu$ m, expanded graphite 8 $\mu$ m, graphite 순으로 입자의 크기가 큰 것을 확인하였다. (Fig. 31 ~ 33 참조)  
또한, 5천배의 배율로 각각의 열전도성 입자를 관찰하였을 때, 모든 열전도성 입자의 구조가 graphite의 구조로 잘 알려진 층상구조로 이루어져 있음을 확인하였다. (Fig. 31 ~ 33 참조)

- 대구대학교 중앙기기에 있는 SEM(Scanning Electron Microscope, 전자주사현미경)을 이용하여 각각의 열전도성 입자 10wt% 함유한 복합재를 500배의 배율로 관찰한 결과, bulk 중합법으로 제작한 복합재의 단면이 solvent 중합법으로 제작한 복합재의 단면보다 거친 것을 볼 수 있는데, 이는 solvent 중합법이 bulk 중합법보다 분산성이 높아 그 표면이 좀 더 매끄럽게 보이는 것으로 추론된다. (Fig. 34-41 참조)

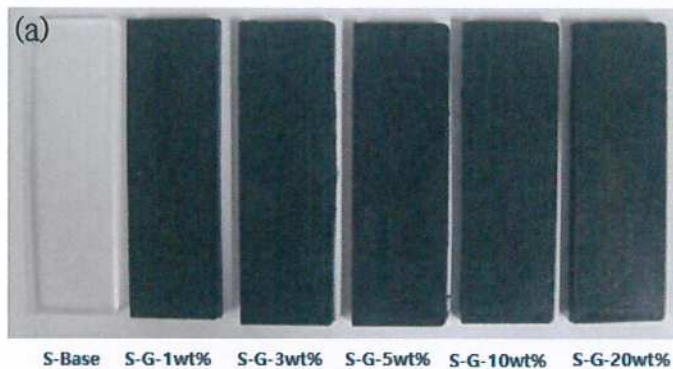
또한, bulk 중합법으로 제작한 복합재의 표면(Fig. 40)에 열전도성 입자가 묻쳐져 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 solution 중합법으로 제작한 복합재의 표면(Fig. 41)에는 열전도성 입자의 묻침이 보이지 않는 것으로 보아 solution 중합법이 bulk 중합법보다 열전도성 입자의 분산성이 높다는 열전도도 결과를 뒷받침 한다.

#### 4. 자기평가

- 이번 과제를 수행하면서 예측 불가능한 변수들을 다방면으로 막힘없이 다룰 수 있도록 좀 더 빈틈없이 꼼꼼하게 계획을 세우도록 노력하였다.
- 한번에 완벽하게 과제를 수행하고 싶은 욕심에 의욕적으로 일을 하려다 보니 수행시간이 길어져 시간을 효율적으로 사용하지 못하였다.

#### 5. 최종 결과물

##### 1) Bulk 중합법으로 제작한 실리콘 복합재



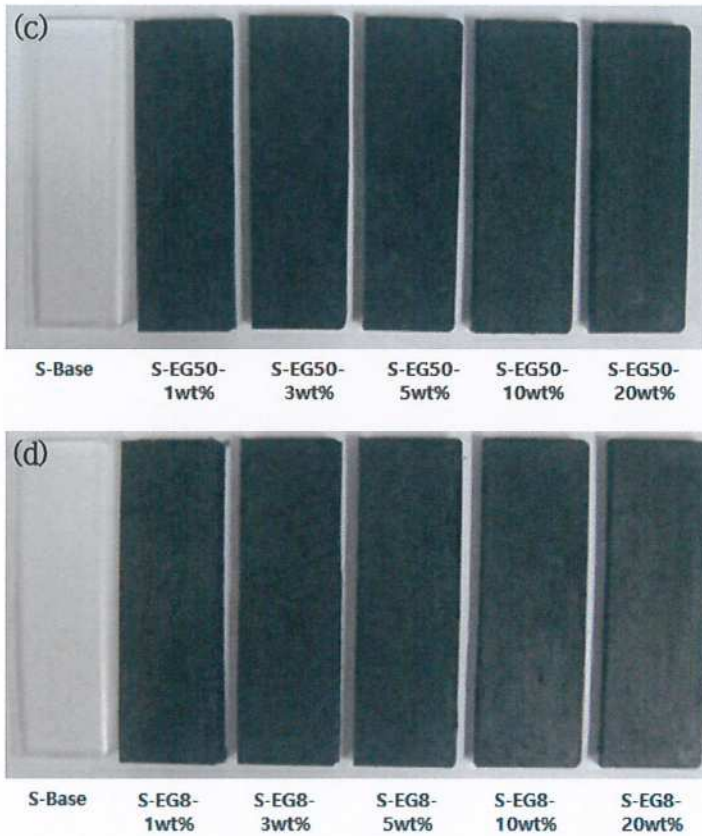


Fig. 8 Composites prepared by bulk mixing method: (a) silicon/graphite; (b) silicon/EG140 $\mu$ m, (c) silicon/EG50 $\mu$ m; (d) silicon/EG8 $\mu$ m.

2) Bulk 중합법으로 제작한 실리콘 복합체의 thermal conductivity 측정 결과

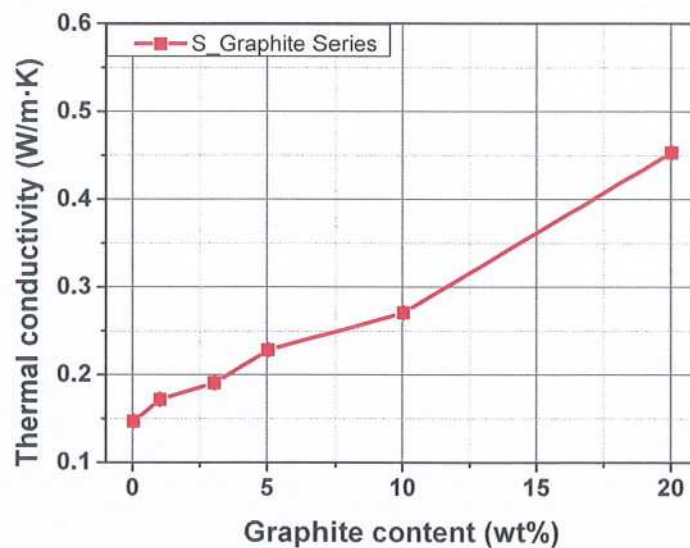


Fig. 9 Thermal conductivity result of silicone/graphite composites prepared by bulk mixing method

Table. 5 Thermal conductivity result of silicone/graphite composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m*K)
	Silicon	Hardener	Particle	Graphite
Base	15.0	1.5	-	0.1466 ± 0.0013
S-G-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1717 ± 0.0042
S-G-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1905 ± 0.0049
S-G-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.2282 ± 0.0035
S-G-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.2705 ± 0.0007
S-G-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.4531 ± 0.0022

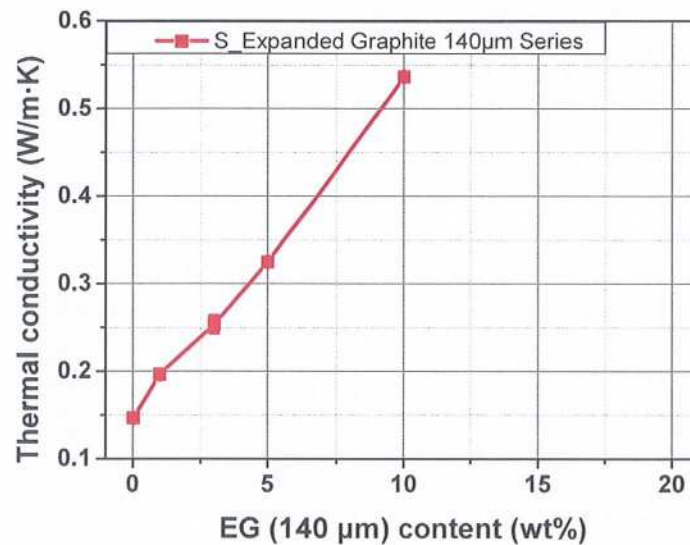

 Fig. 10 Thermal conductivity result of silicone/expanded graphite 140 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

 Table. 6 Thermal conductivity result of silicone/expanded graphite 140 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m*K)
	Silicon	Hardener	Particle	Expanded graphite 140 $\mu$ m
Base	15.0	1.5	-	0.1466 ± 0.0013
S-EG140-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1966 ± 0.0001
S-EG140-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.2539 ± 0.0097
S-EG140-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.3249 ± 0.0009
S-EG140-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.5362 ± 0.0026
S-EG140-20wt%	12.0	1.2	3.20	-



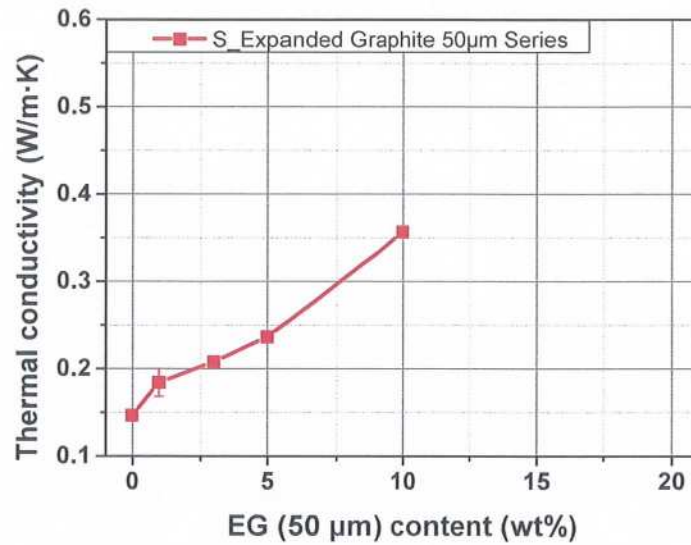


Fig. 11 Thermal conductivity result of silicone/expanded graphite 50 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

Table. 7 Thermal conductivity result of silicone/expanded graphite 50 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> *K)
	Silicon	Hardener	Particle	Expanded graphite 50 $\mu$ m
Base	15.0	1.5	-	0.1466 ± 0.0013
S-EG50-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1842 ± 0.0159
S-EG50-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.2081 ± 0.0006
S-EG50-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.2364 ± 0.0003
S-EG50-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.3565 ± 0.0018
S-EG50-20wt%	12.0	1.2	3.20	-

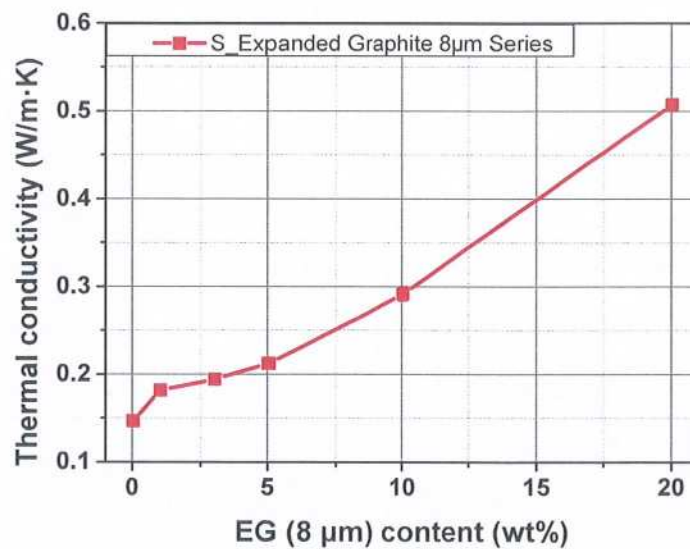


Fig. 12 Thermal conductivity result of silicone/expanded graphite 8 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

Table. 8 Thermal conductivity result of silicone/expanded graphite 8 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> *K)
	Silicon	Hardener	Particle	Expanded graphite 8 $\mu$ m
Base	15.0	1.5	-	0.1466 $\pm$ 0.0013
S-EG8-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1817 $\pm$ 0.0058
S-EG8-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1940 $\pm$ 0.0060
S-EG8-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.2124 $\pm$ 0.0014
S-EG8-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.2914 $\pm$ 0.0079
S-EG8-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.5077 $\pm$ 0.0004

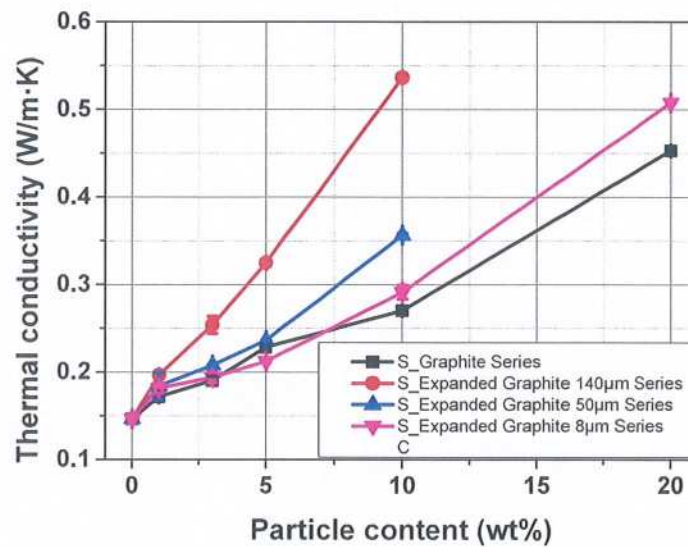
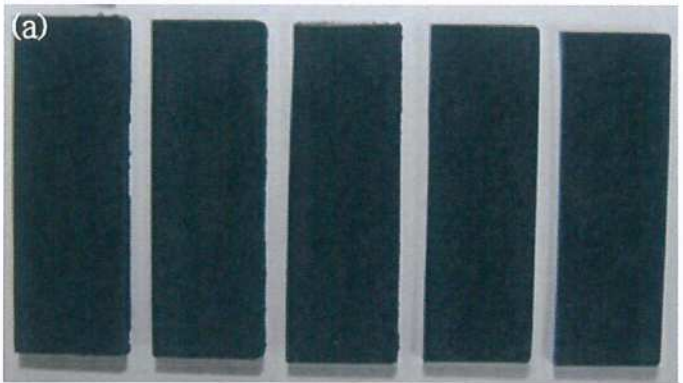


Fig. 13 Summarized thermal conductivity result of silicone composites prepared by bulk mixing method

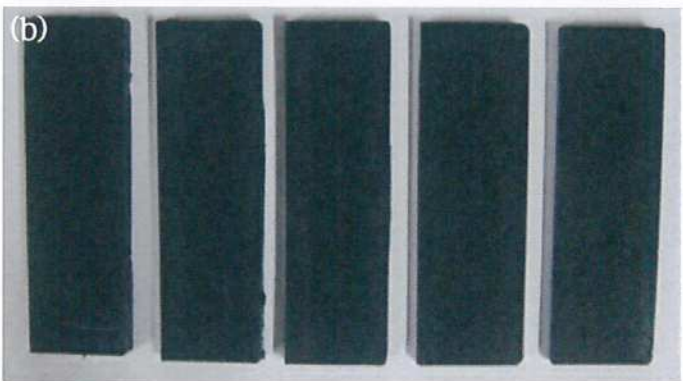
Table. 9 Summarized thermal conductivity result of silicone composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> *K)			
	Silicon	Hardener	Particle	Graphite	Expanded graphite 140 $\mu$ m	Expanded graphite 50 $\mu$ m	Expanded graphite 8 $\mu$ m
Base	15.0	1.5	-	0.1466 $\pm$ 0.0013	0.1466 $\pm$ 0.0013	0.1466 $\pm$ 0.0013	0.1466 $\pm$ 0.0013
Particle-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1717 $\pm$ 0.0042	0.1966 $\pm$ 0.0001	0.1842 $\pm$ 0.0159	0.1817 $\pm$ 0.0058
Particle-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1905 $\pm$ 0.0049	0.2539 $\pm$ 0.0097	0.2081 $\pm$ 0.0006	0.1940 $\pm$ 0.0060
Particle-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.2282 $\pm$ 0.0035	0.3249 $\pm$ 0.0009	0.2364 $\pm$ 0.0003	0.2124 $\pm$ 0.0014
Particle-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.2705 $\pm$ 0.0007	0.5362 $\pm$ 0.0026	0.3565 $\pm$ 0.0018	0.2914 $\pm$ 0.0079
Particle-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.4531 $\pm$ 0.0022	-	-	0.5077 $\pm$ 0.0004

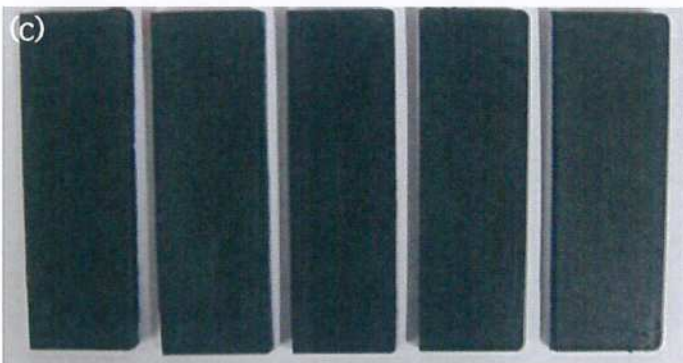
3) Solution 중합법으로 제작한 실리콘 복합재



S-G-1wt%   S-G-3wt%   S-G-5wt%   S-G-10wt%   S-G-20wt%



S-EG140-1wt%\_S   S-EG140-3wt%\_S   S-EG140-5wt%\_S   S-EG140-10wt%\_S   S-EG140-20wt%\_S



S-EG50-1wt%\_S   S-EG50-3wt%\_S   S-EG50-5wt%\_S   S-EG50-10wt%\_S   S-EG50-20wt%\_S

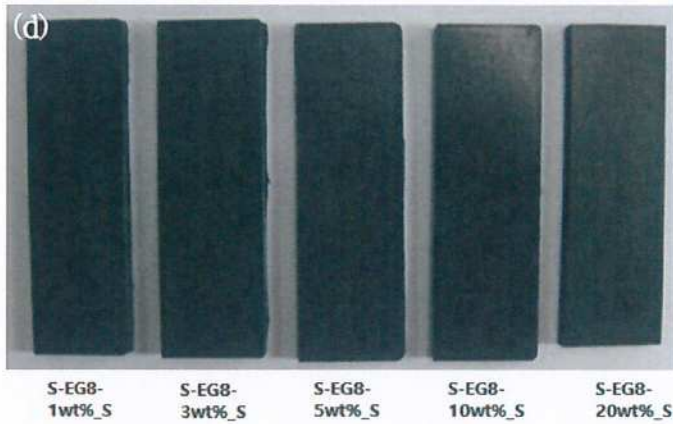


Fig. 14 Composites prepared by solution mixing method: (a) silicon/graphite; (b) silicon/EG140 $\mu$ m, (c) silicon/EG50 $\mu$ m; (d) silicon/EG8 $\mu$ m.

4) Solution 중합법으로 제작한 실리콘 복합재의 thermal conductivity 측정 결과

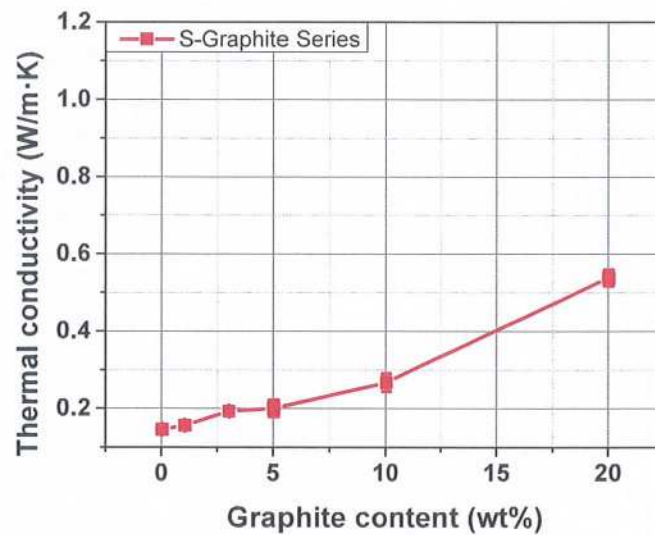


Fig. 15 Thermal Conductivity Result of silicone/graphite composites prepared by solution mixing method

Table. 10 Thermal Conductivity Result of silicone/graphite composites prepared by solution mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> *K)
	Silicon	Hardener	Particle	
Base	15.0	1.5	-	0.1466 ± 0.0013
S-G-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1568 ± 0.0058
S-G-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1935 ± 0.008
S-G-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.2007 ± 0.0211
S-G-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.2679 ± 0.0225
S-G-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.5389 ± 0.0205

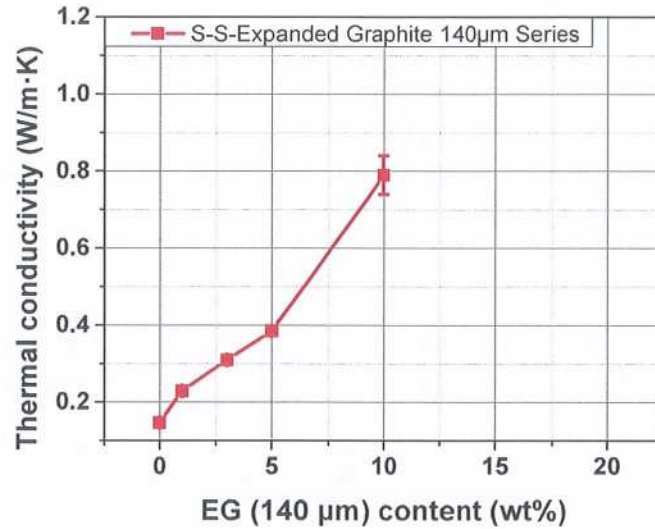


Fig. 16 Thermal Conductivity Result of silicone/expanded graphite 140 $\mu$ m composites prepared by solution mixing method

Table. 11 Thermal Conductivity Result of silicone/expanded graphite 140 $\mu$ m composites prepared by solution mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> *K) Expanded graphite 140 $\mu$ m
	Silicon	Hardener	Particle	
Base	15.0	1.5	-	0.1466 ± 0.0013
S-EG140-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.2290 ± 0.0030
S-EG140-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.3095 ± 0.0063
S-EG140-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.3848 ± 0.0019
S-EG140-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.7890 ± 0.0501
S-EG140-20wt%	12.0	1.2	3.20	-

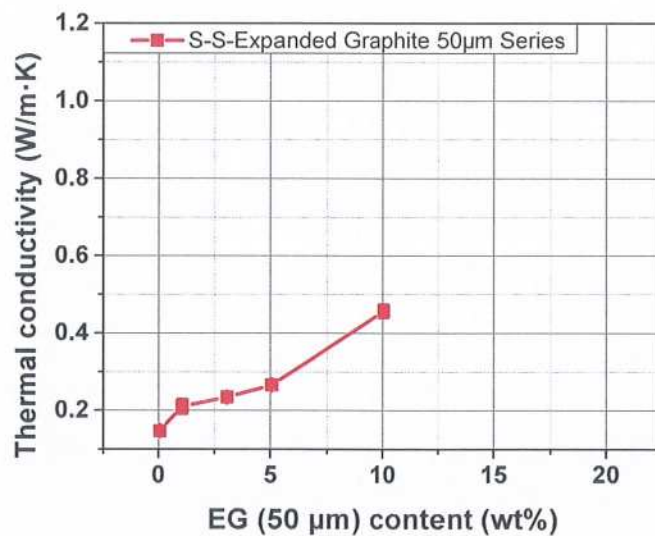


Fig. 17 Thermal Conductivity Result of silicone/expanded graphite 50 $\mu$ m composites prepared by solution mixing method

Table. 12 Thermal Conductivity Result of silicone/expanded graphite 50 $\mu$ m composites prepared by solution mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> K) Expanded graphite 50 $\mu$ m
	Silicon	Hardener	Particle	
Base	15.0	1.5	-	0.1466 $\pm$ 0.0013
S-EG50-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.2100 $\pm$ 0.0179
S-EG50-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.2342 $\pm$ 0.0028
S-EG50-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.2657 $\pm$ 0.0033
S-EG50-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.4565 $\pm$ 0.0165
S-EG50-20wt%	12.0	1.2	3.20	-

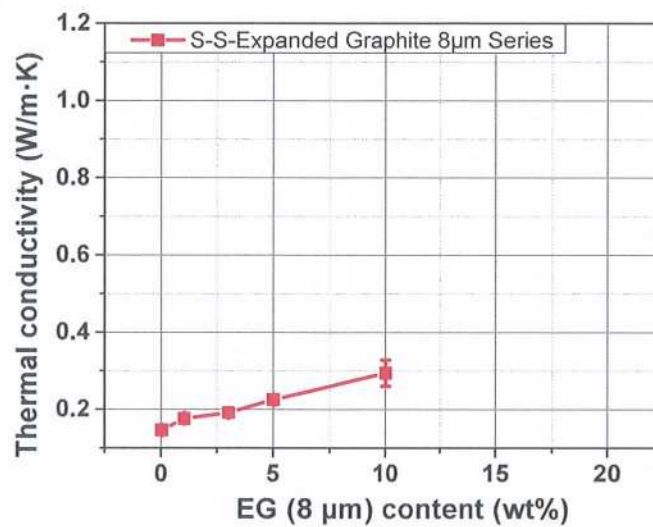


Fig. 18 Thermal Conductivity Result of silicone/expanded graphite 8 $\mu$ m composites prepared by solution mixing method

Table. 13 Thermal Conductivity Result of silicone/expanded graphite 8 $\mu$ m composites prepared by solution mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m <sup>2</sup> K) Expanded graphite 8 $\mu$ m
	Silicon	Hardener	Particle	
Base	15.0	1.5	-	0.1466 $\pm$ 0.0013
S-EG8-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1768 $\pm$ 0.0044
S-EG8-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1921 $\pm$ 0.0001
S-EG8-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.2255 $\pm$ 0.004
S-EG8-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.2945 $\pm$ 0.0337
S-EG8-20wt%	12.0	1.2	3.20	-

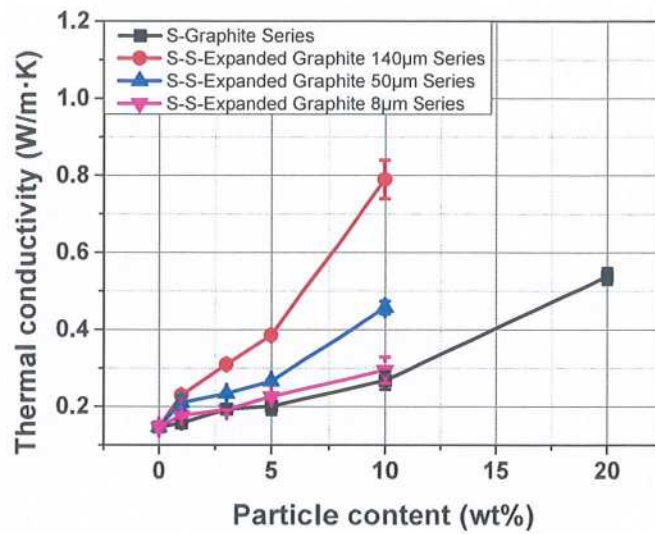


Fig. 19 Summarized thermal conductivity result of silicone composites prepared by solution mixing method

Table. 14 Summarized thermal conductivity result of silicone composites prepared by solution mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Thermal conductivity (W/m·K)			
	Silicon	Hardener	Particle	Graphite	Expanded graphite 140µm	Expanded graphite 50µm	Expanded graphite 8µm
Base	15.0	1.5	-	0.1466 ± 0.0013	0.1466 ± 0.0013	0.1466 ± 0.0013	0.1466 ± 0.0013
Particle-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1568 ± 0.0058	0.2290 ± 0.0030	0.2100 ± 0.0179	0.1768 ± 0.0044
Particle-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1935 ± 0.008	0.3095 ± 0.0063	0.2342 ± 0.0028	0.1921 ± 0.0001
Particle-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.2007 ± 0.0211	0.3848 ± 0.0019	0.2657 ± 0.0033	0.2255 ± 0.004
Particle-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.2679 ± 0.0225	0.7890 ± 0.0501	0.4565 ± 0.0165	0.2945 ± 0.0337
Particle-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.5389 ± 0.0205	-	-	-

4) Bulk 중합법으로 제작한 실리콘 복합체의 tensile 측정 결과

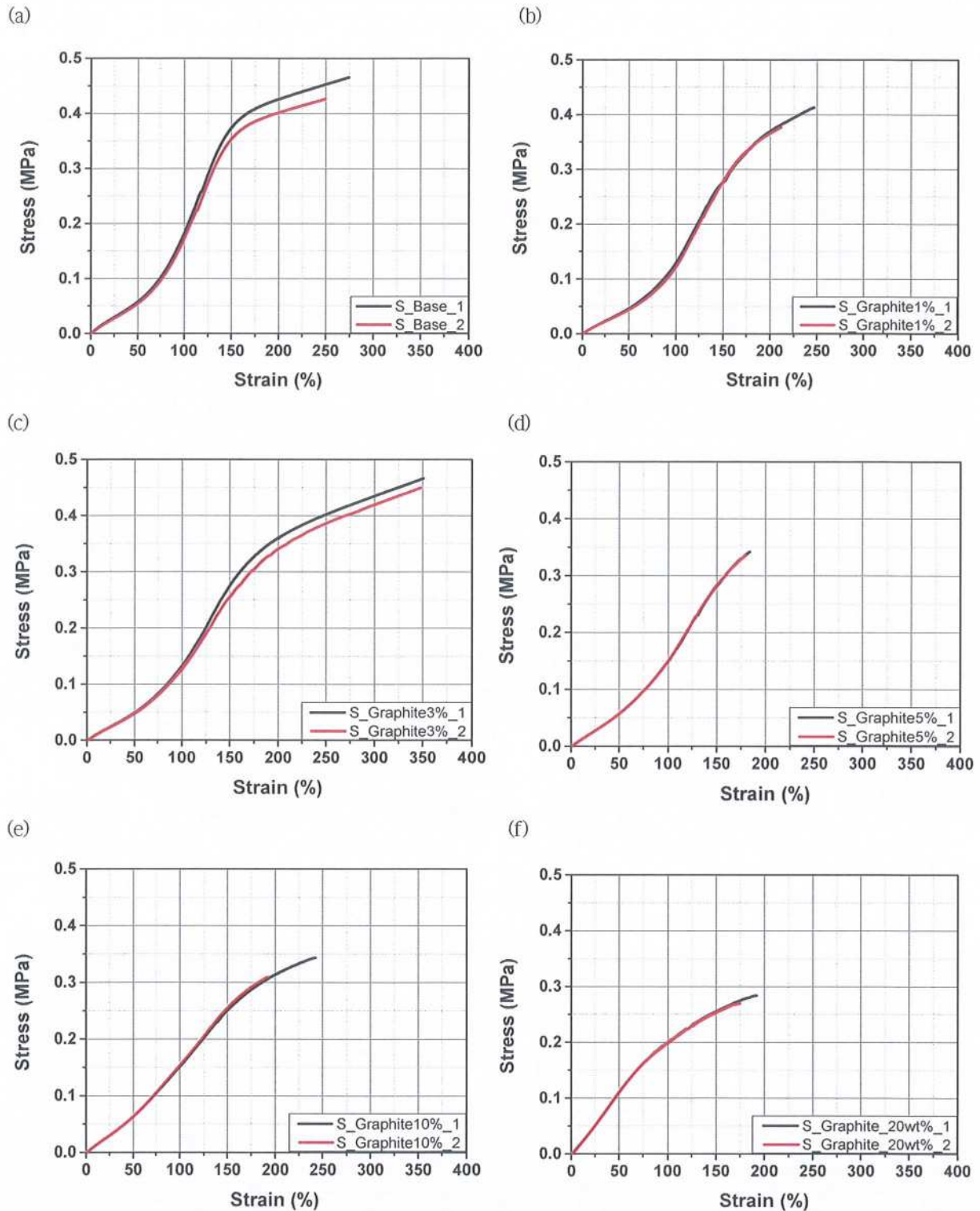


Fig. 20 Tensile result of composite prepared by bulk mixing method: (a) silicon; (b) silicon/graphite 1wt%; (c) silicon/graphite 3wt%; (d) silicon/graphite 5wt%; (e) silicon/graphite 10wt%; (f) silicon/graphite 20wt%



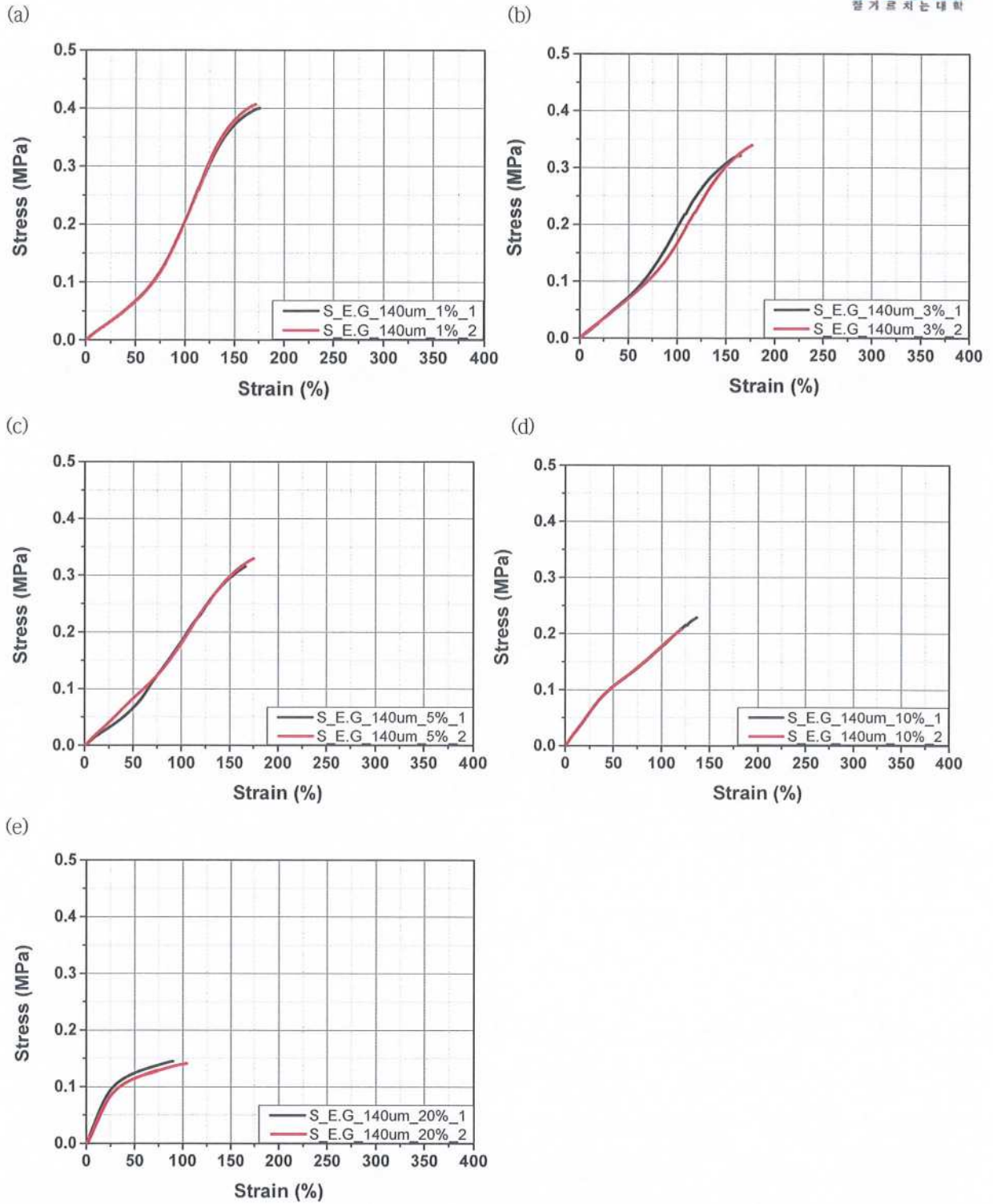


Fig. 21 Tensile result of composite prepared by bulk mixing method: (a) silicon; (b) silicon/EG140µm 1wt%; (c) silicon/EG140µm 3wt%; (d) silicon/EG140µm 5wt%; (e) silicon/EG140µm 10wt%; (f) silicon/EG140µm 20wt%

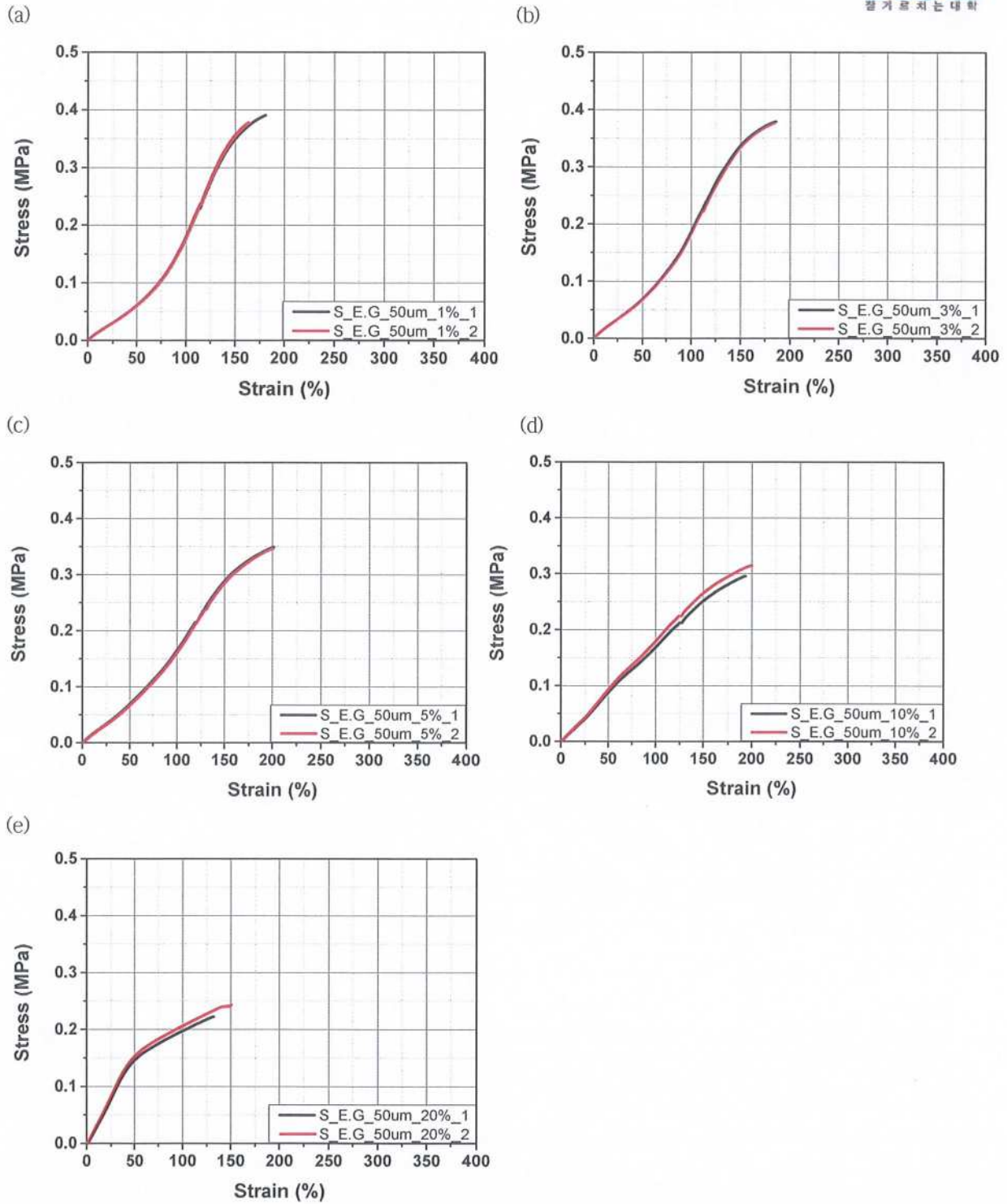


Fig. 22 Tensile result of composite prepared by bulk mixing method: (a) silicon; (b) silicon/EG50 $\mu$ m 1wt%; (c) silicon/EG50 $\mu$ m 3wt%; (d) silicon/EG50 $\mu$ m 5wt%; (e) silicon/EG50 $\mu$ m 10wt%; (f) silicon/EG50 $\mu$ m 20wt%

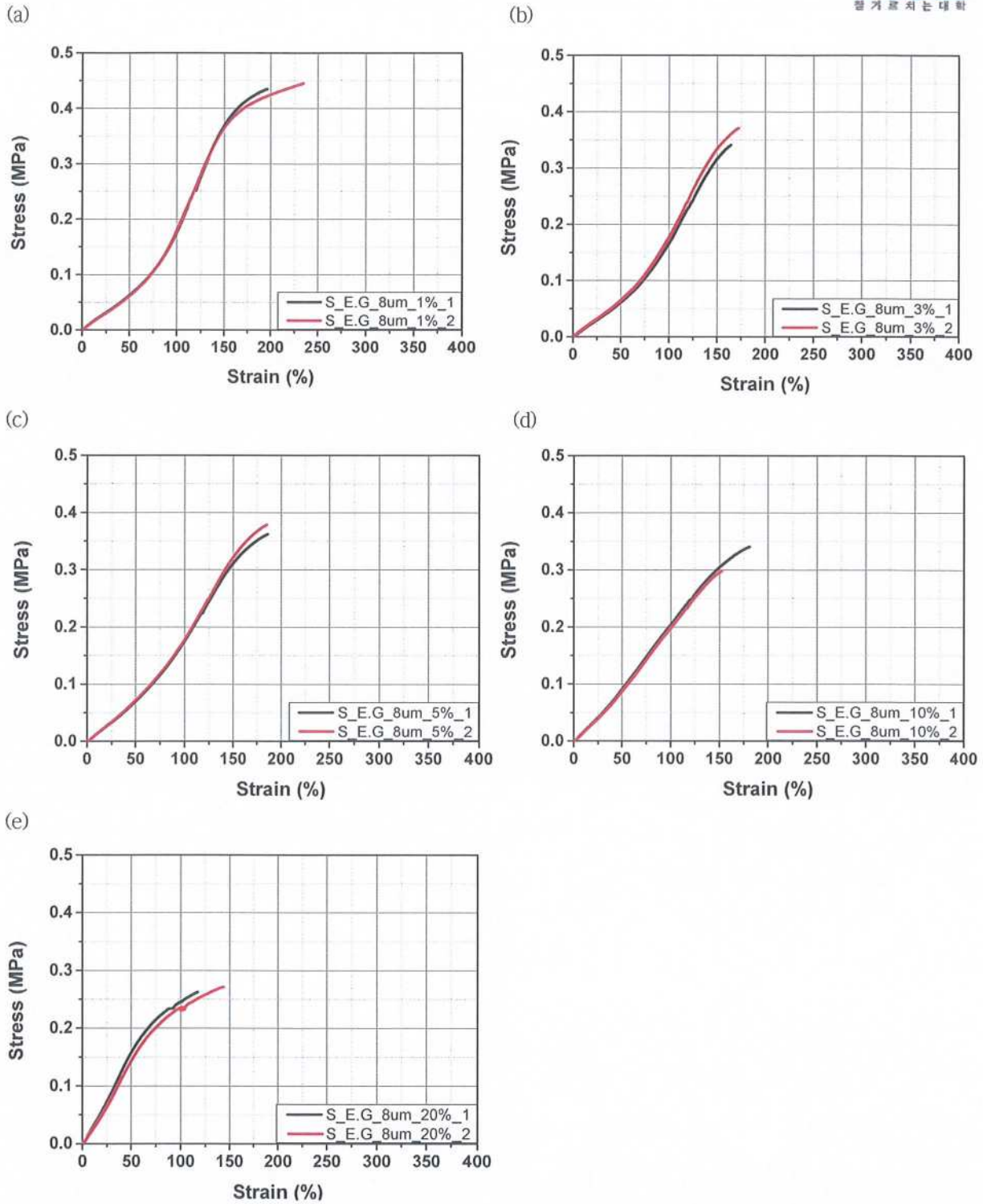


Fig. 23 Tensile result of composite prepared by bulk mixing method: (a) silicon; (b) silicon/EG8 $\mu$ m 1wt%; (c) silicon/EG8 $\mu$ m 3wt%; (d) silicon/EG8 $\mu$ m 5wt%; (e) silicon/EG8 $\mu$ m 10wt%; (f) silicon/EG8 $\mu$ m 20wt%

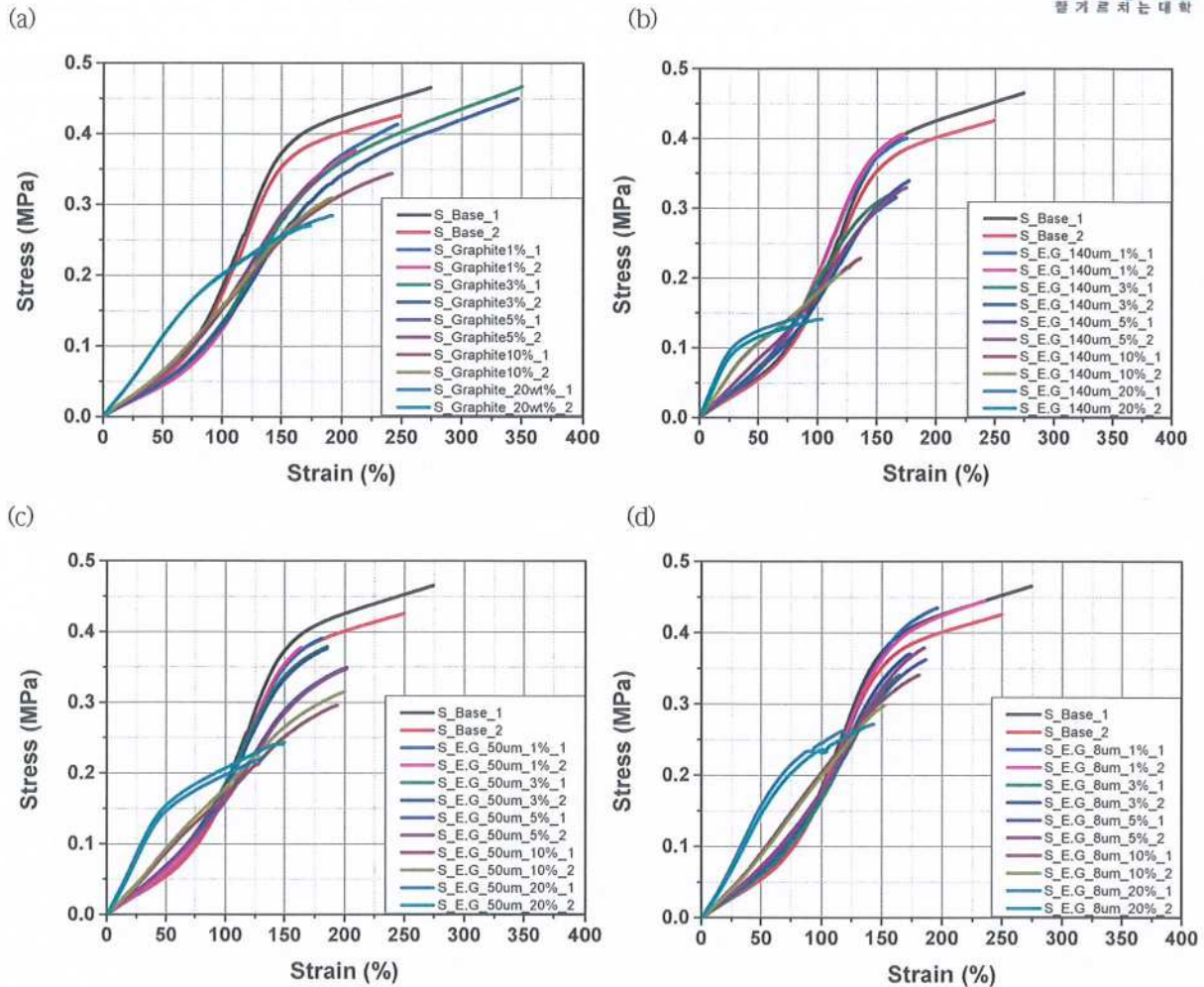


Fig. 24 Summarized Tensile result of modulus result of silicone composites prepared by bulk mixing method: (a) silicon; (b) silicon/EG<sub>8µm</sub> 1wt%; (c) silicon/EG<sub>8µm</sub> 3wt%; (d) silicon/EG<sub>8µm</sub> 5wt%; (e) silicon/EG<sub>8µm</sub> 10wt%; (f) silicon/EG<sub>8µm</sub> 20wt%

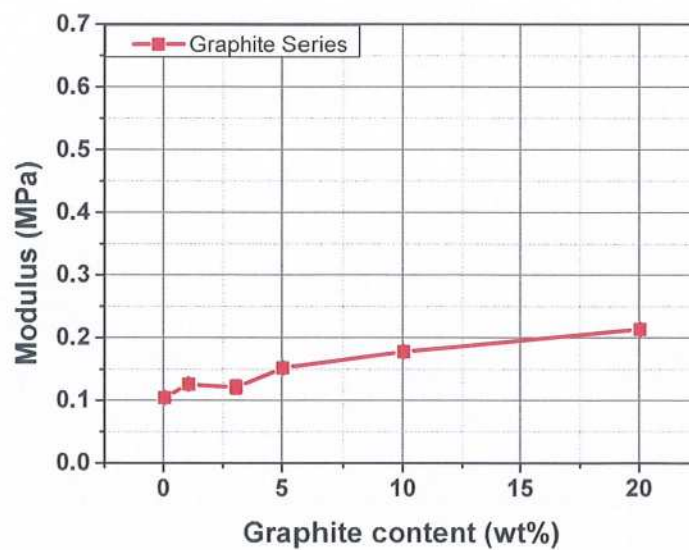


Fig. 25 Modulus result of silicone/graphite composites prepared by bulk mixing method

Table. 15 Modulus result of silicone/graphite composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Tensile strength
	Silicon	Hardener	Particle	Modulus (MPa)
S-Base	15.0	1.5	-	0.1040 ± 0.0069
S-G-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1249 ± 0.0062
S-G-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1203 ± 0.0095
S-G-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.1515 ± 0.0013
S-G-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.1776 ± 0.0009
S-G-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.2141 ± 0.0011

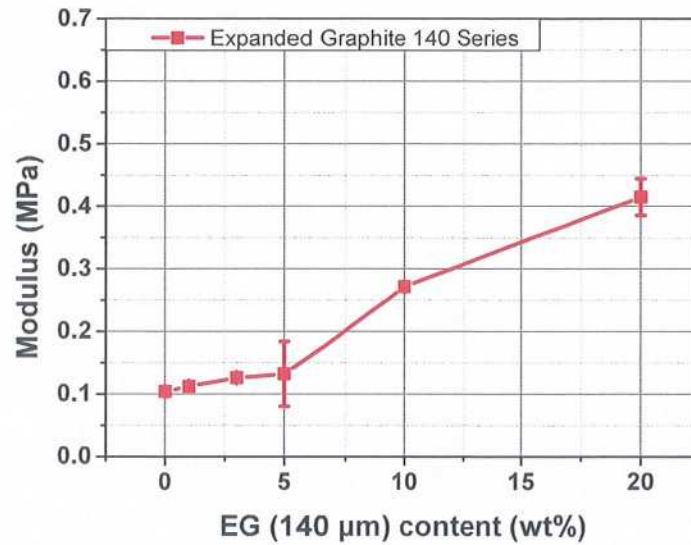

 Fig. 26 Modulus result of silicone/graphite 140 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

 Table. 16 Modulus result of silicone/graphite 140 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Tensile strength
	Silicon	Hardener	Particle	Modulus (MPa)
S-Base	15.0	1.5	-	0.1040 ± 0.0069
S-EG140-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1116 ± 0.0008
S-EG140-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1258 ± 0.0062
S-EG140-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.1318 ± 0.0519
S-EG140-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.2713 ± 0.0020
S-EG140-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.4148 ± 0.0295

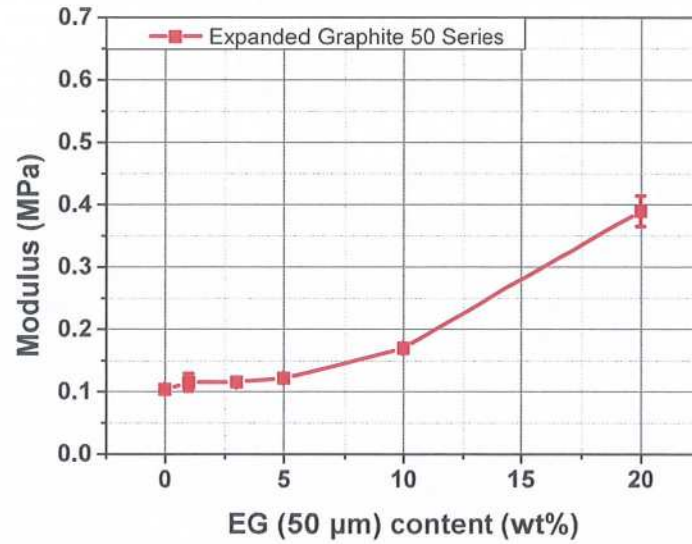


Fig. 27 Modulus result of silicone/graphite 50 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

Table. 17 Modulus result of silicone/graphite 50 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Tensile strength Modulus (MPa)
	Silicon	Hardener	Particle	
S-Base	15.0	1.5	-	0.1040 $\pm$ 0.0069
S-EG50-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1146 $\pm$ 0.0141
S-EG50-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1157 $\pm$ 0.0001
S-EG50-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.1217 $\pm$ 0.0037
S-EG50-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.1695 $\pm$ 0.0078
S-EG50-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.3893 $\pm$ 0.0243

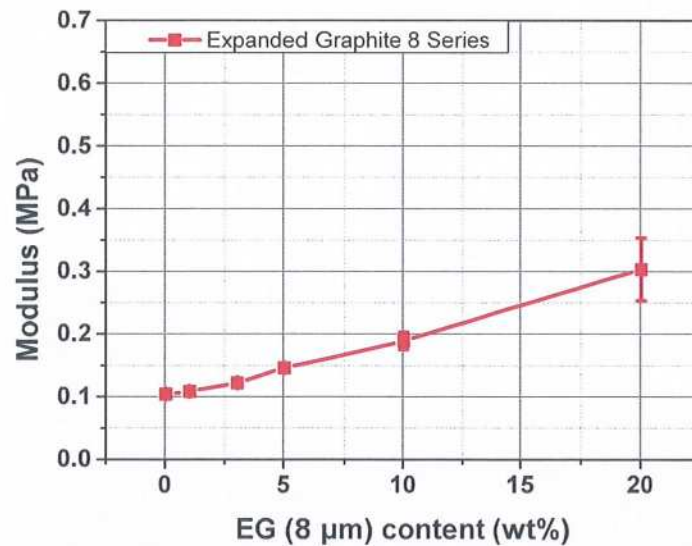


Fig. 28 Modulus result of silicone/graphite 8 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

Table. 18 Modulus result of silicone/graphite 8 $\mu$ m composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Tensile strength
	Silicon	Hardener	Particle	Modulus (MPa)
S-Base	15.0	1.5	-	0.1040 $\pm$ 0.0069
S-EG8-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1081 $\pm$ 0.0062
S-EG8-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1221 $\pm$ 0.0031
S-EG8-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.1459 $\pm$ 0.0037
S-EG8-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.1890 $\pm$ 0.0138
S-EG8-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.3031 $\pm$ 0.0500

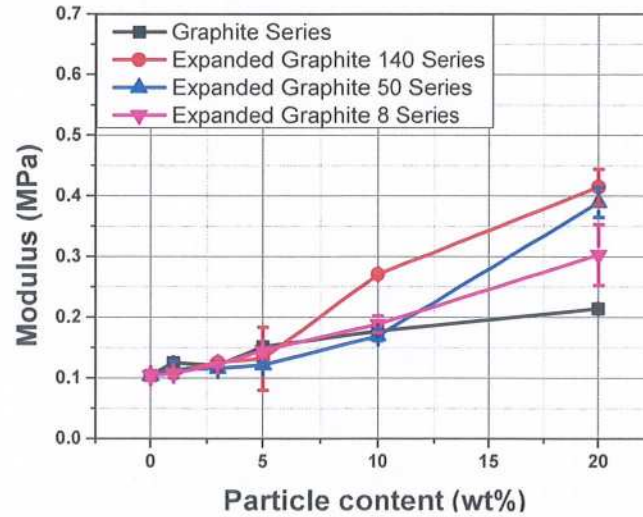


Fig. 29 Summarized modulus result of silicone composites prepared by bulk mixing method

Table. 19 Summarized modulus result of silicone composites prepared by bulk mixing method

EXP. No	Matrix polymer (g)			Modulus (MPa)			
	Silicon	Hardener	Particle	Graphite	Expanded graphite 140 $\mu$ m	Expanded graphite 50 $\mu$ m	Expanded graphite 8 $\mu$ m
Base	15.0	1.5	-	0.1040 $\pm$ 0.0069	0.1040 $\pm$ 0.0069	0.1040 $\pm$ 0.0069	0.1040 $\pm$ 0.0069
Particle-1wt%	14.8	1.4	0.16	0.1249 $\pm$ 0.0062	0.1116 $\pm$ 0.0008	0.1146 $\pm$ 0.0141	0.1081 $\pm$ 0.0062
Particle-3wt%	14.5	1.4	0.48	0.1203 $\pm$ 0.0095	0.1258 $\pm$ 0.0062	0.1157 $\pm$ 0.0001	0.1221 $\pm$ 0.0031
Particle-5wt%	14.2	1.4	0.80	0.1515 $\pm$ 0.0013	0.1318 $\pm$ 0.0519	0.1217 $\pm$ 0.0037	0.1459 $\pm$ 0.0037
Particle-10wt%	13.5	1.3	1.60	0.1776 $\pm$ 0.0009	0.2713 $\pm$ 0.0020	0.1695 $\pm$ 0.0078	0.1890 $\pm$ 0.0138
Particle-20wt%	12.0	1.2	3.20	0.2141 $\pm$ 0.0011	0.4148 $\pm$ 0.0295	0.3893 $\pm$ 0.0243	0.3031 $\pm$ 0.0500

4) SEM (Scanning Electron Microscope, 전자주사현미경)으로 촬영한 열전도성 입자 사진

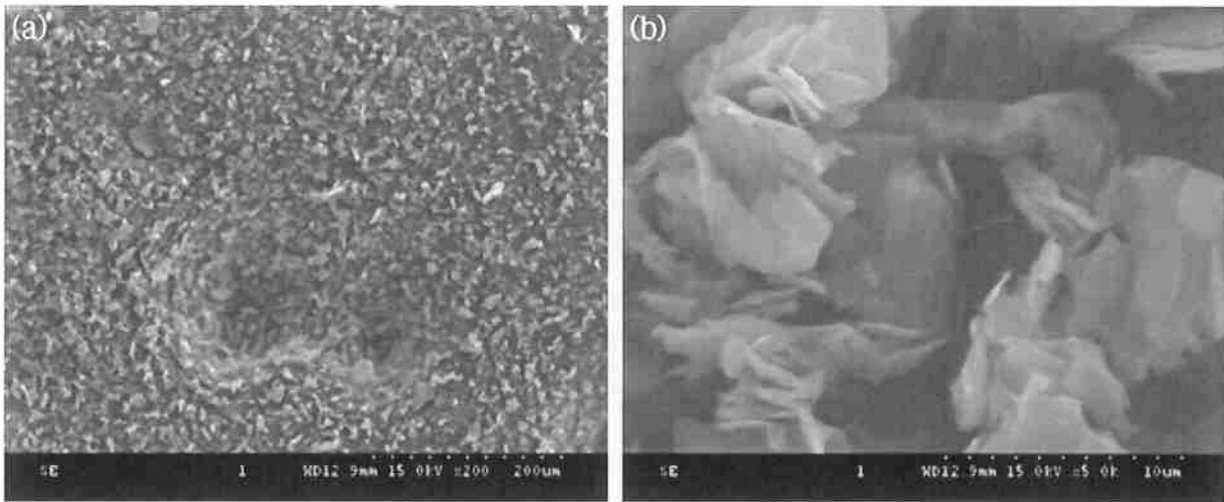


Fig. 30 SEM images of graphite: (a) 200×magnification of graphite; (b) 5.0k× magnification of graphite.

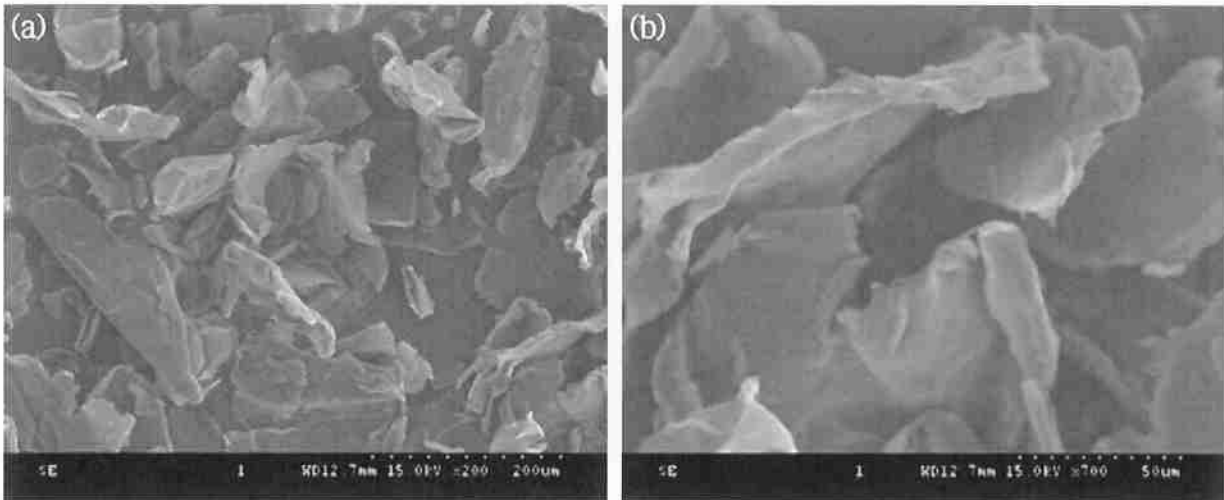


Fig. 31 SEM images of expanded graphite 140µm: (a) 200×magnification of EG140µm; (b) 5.0k× magnification of EG140µm.

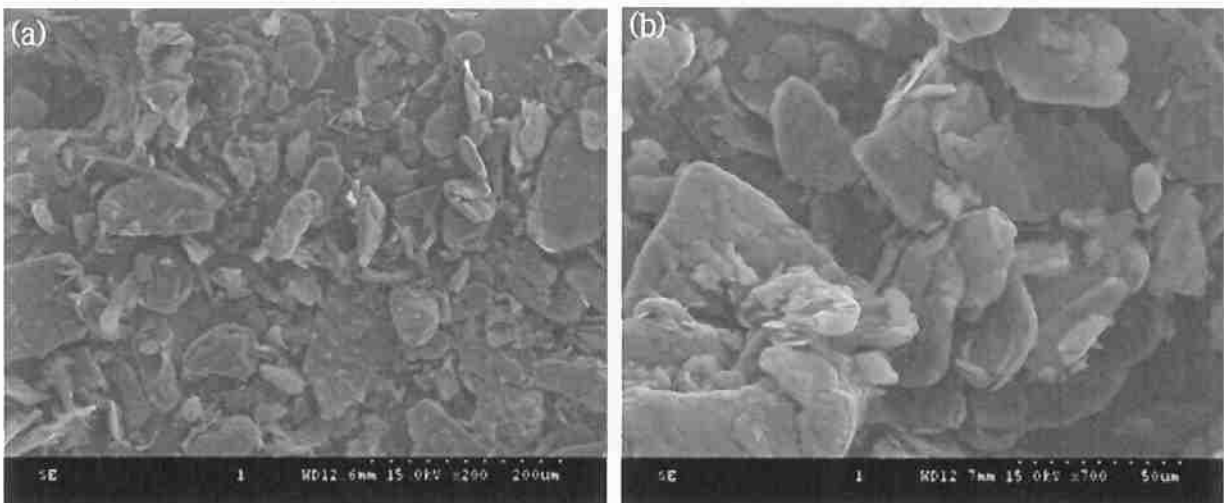


Fig. 32 SEM images of expanded graphite 50µm: (a) 200×magnification of EG50µm; (b) 5.0k× magnification of EG50µm.



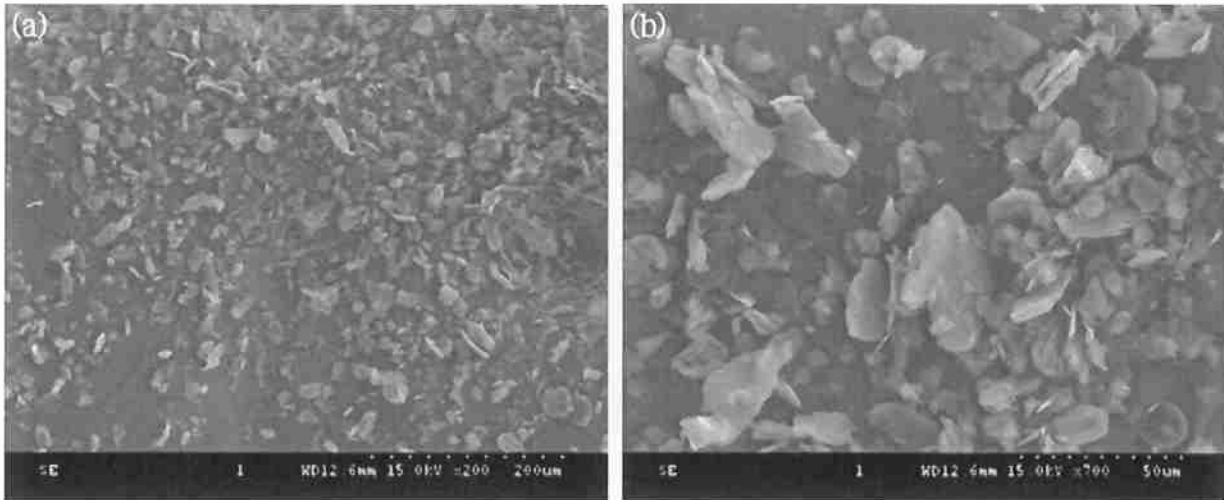


Fig. 33 SEM images of expanded graphite 8 $\mu$ m: (a) 200 $\times$  magnification of EG8 $\mu$ m; (b) 5.0k $\times$  magnification of EG8 $\mu$ m.

5) SEM (Scanning Electron Microscope, 전자주사현미경)으로 촬영한 실리콘 복합재 사진

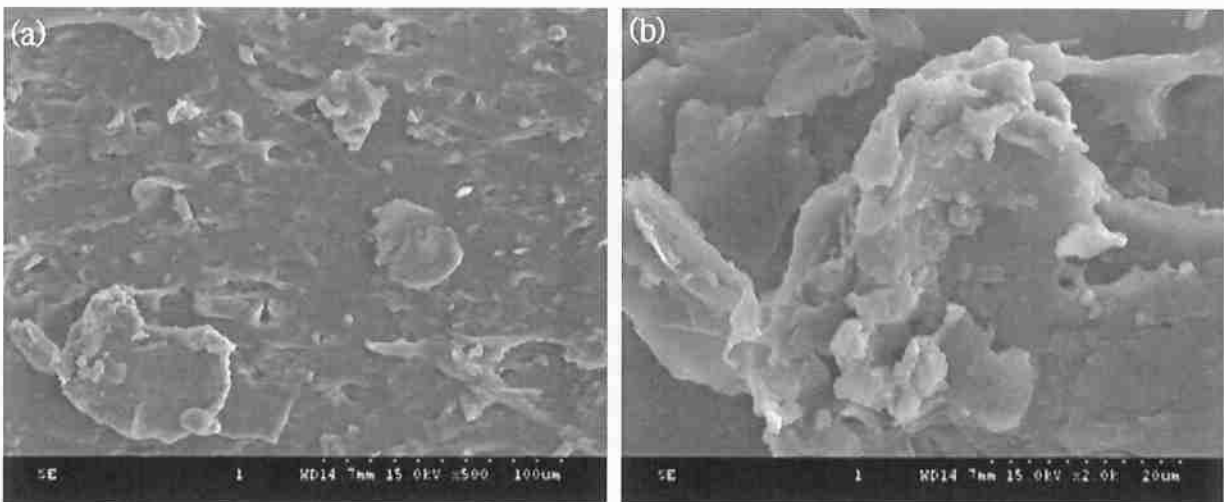


Fig. 34 SEM images of silicone/graphite 10wt% composite prepared by bulk mixing method: (a) 500 $\times$  magnification; (b) 5.0k $\times$  magnification.

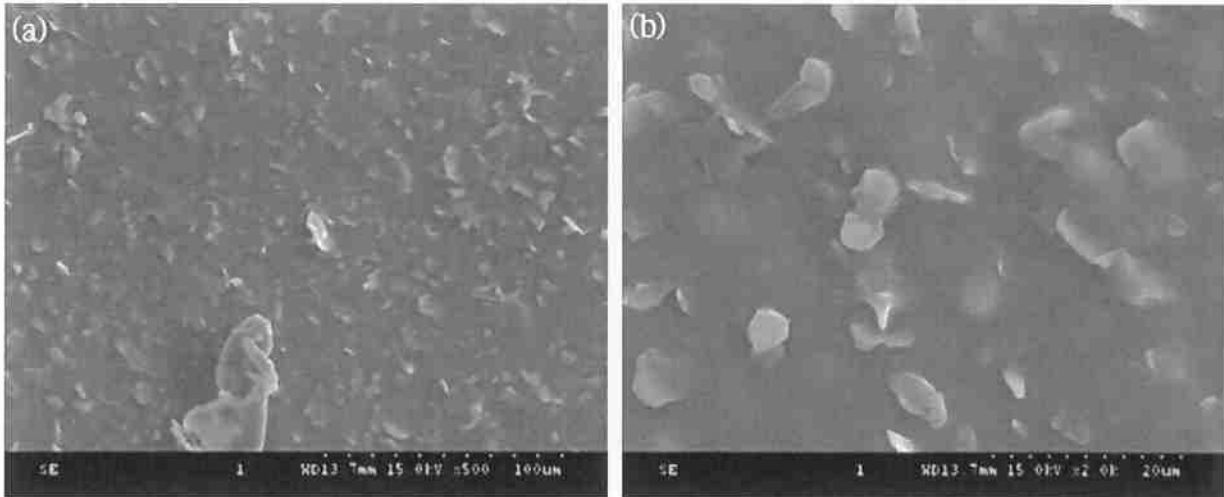


Fig. 35 SEM images of silicone/graphite 10wt% composite prepared by solution mixing method: (a) 500×magnification; (b) 5.0k× magnification.

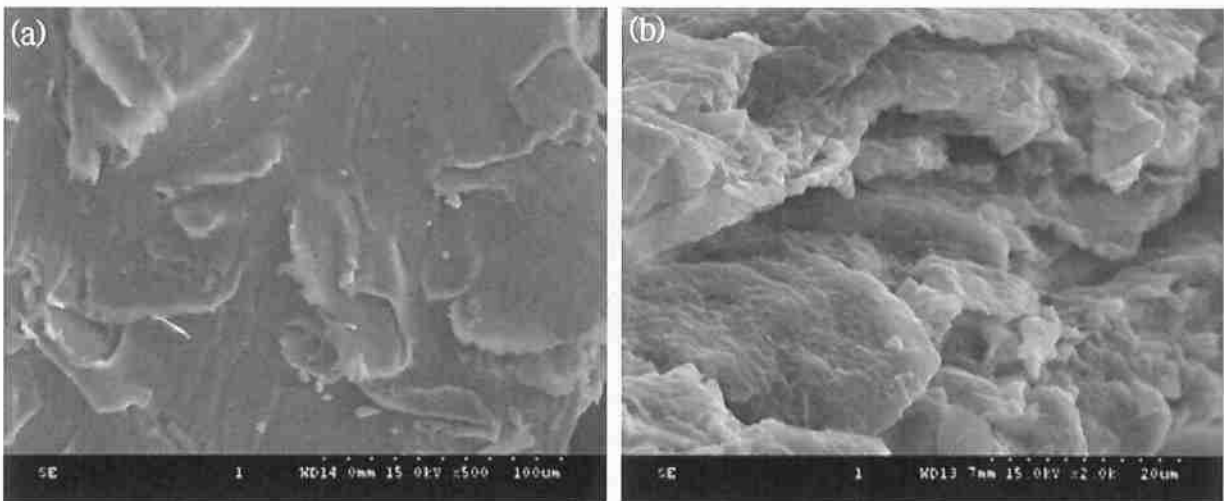


Fig. 36 SEM images of silicone/expanded graphite 140μm 10wt% composite prepared by bulk mixing method: (a) 500×magnification; (b) 5.0k× magnification.

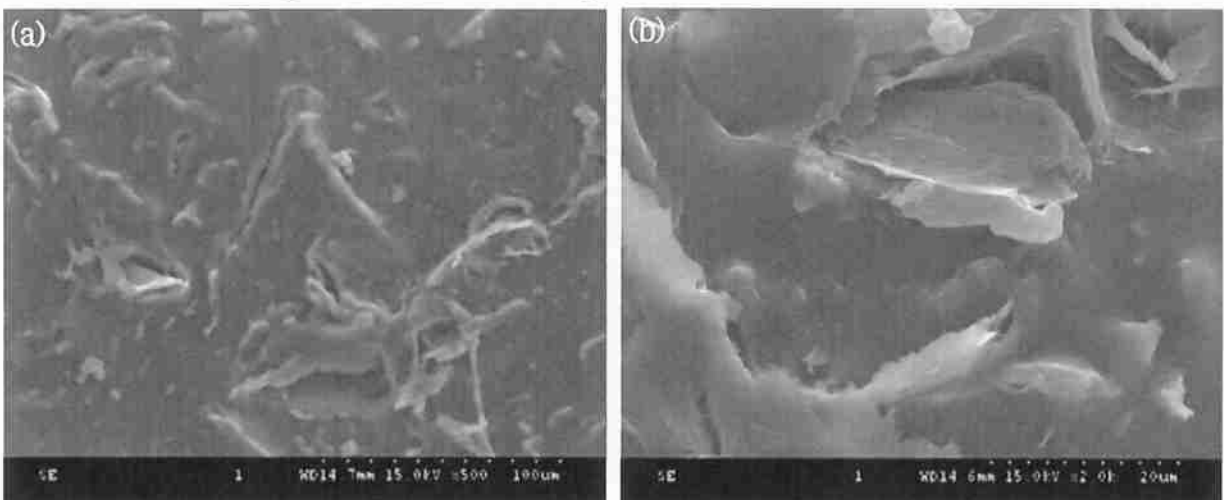


Fig. 37 SEM images of silicone/expanded graphite 140μm 10wt% composite prepared by solution mixing method: (a) 500×magnification; (b) 5.0k× magnification.

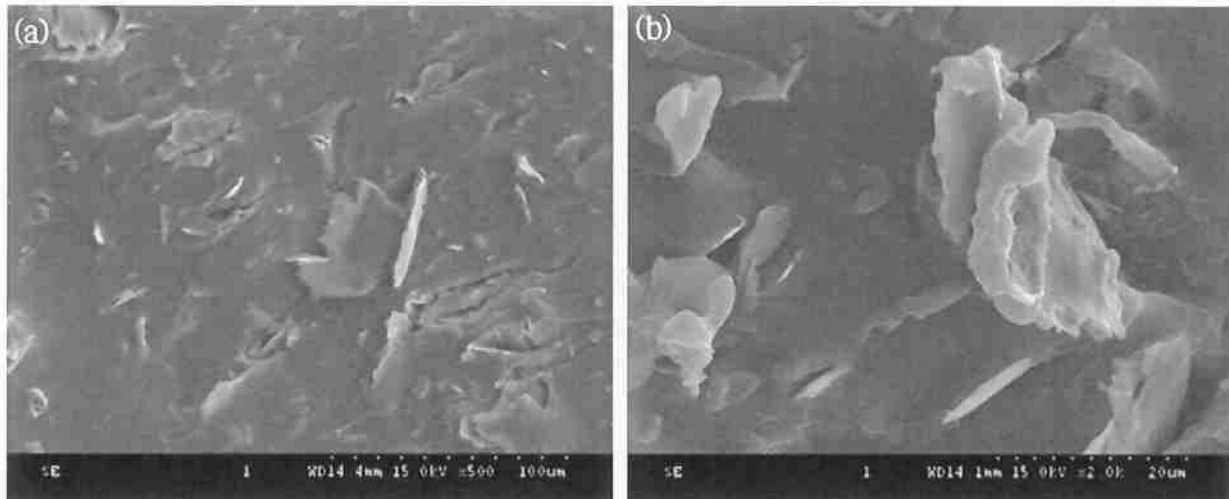


Fig. 38 SEM images of silicone/expanded graphite 50µm 10wt% composite prepared by bulk mixing method: (a) 500×magnification; (b) 5.0k× magnification.

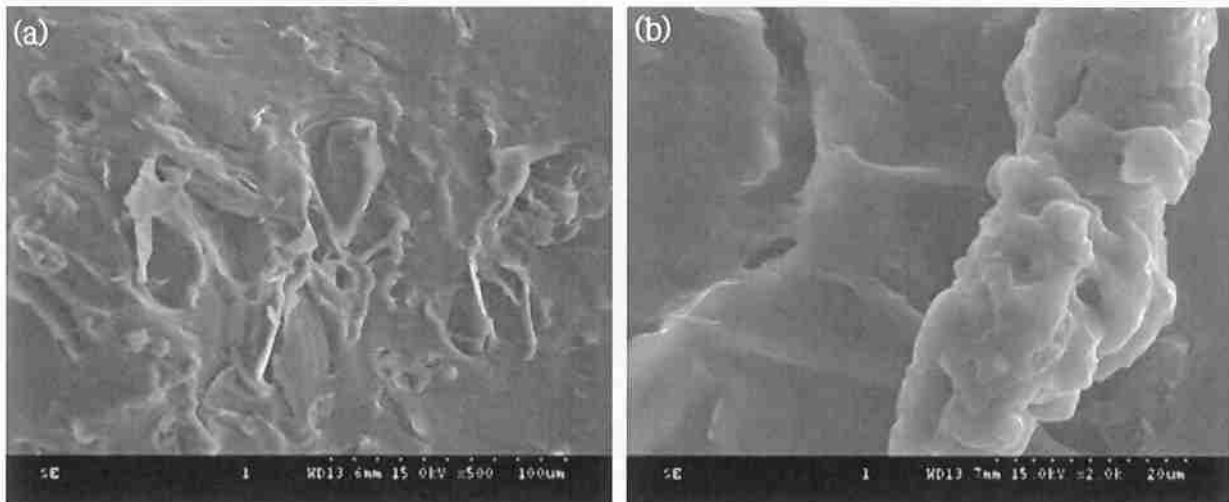


Fig. 39 SEM images of silicone/expanded graphite 50µm 10wt% composite prepared by solution mixing method: (a) 500×magnification; (b) 5.0k× magnification.

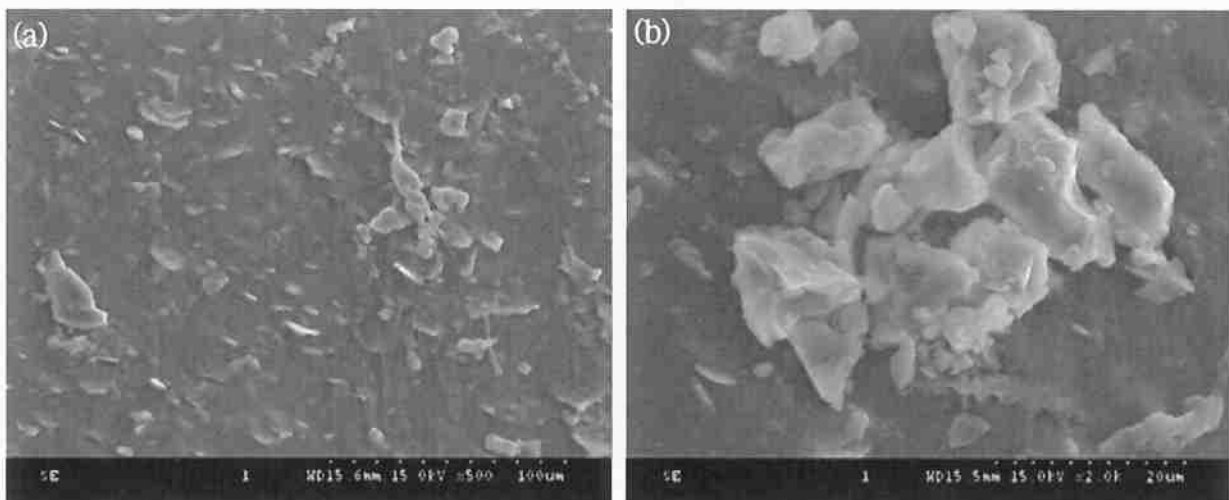


Fig. 40 SEM images of silicone/expanded graphite 8µm 10wt% composite prepared by bulk mixing method: (a) 500×magnification; (b) 5.0k× magnification.

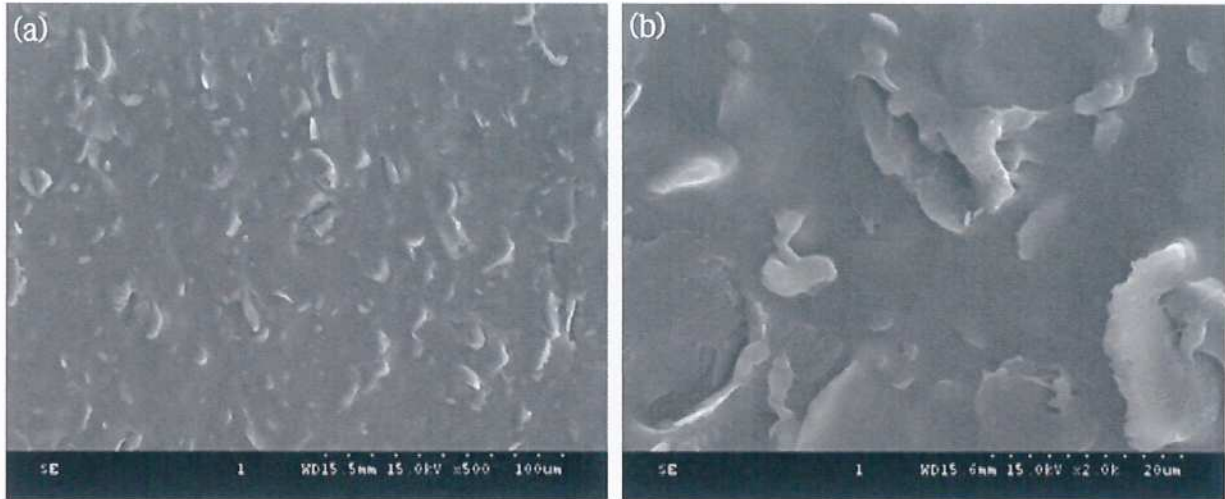


Fig. 41 SEM images of silicone/expanded graphite  $8\mu\text{m}$  10wt% composite prepared by solution mixing method: (a)  $500\times$  magnification; (b)  $5.0\text{k}\times$  magnification.