

## 유리비드가 EVA/MWCNT 발포체의 분산특성에 미치는 영향

김태윤 · 이승현 · 정일두<sup>†</sup>

부산대학교 고분자공학과

(2018년 05월 02일 접수, 2018년 06월 13일 수정, 2018년 06월 15일 채택)

### Effect of glass beads on dispersion properties of EVA/MWCNT foams

Taeyoon Kim, Seunghyun Lee and Ildoo Ching<sup>†</sup>

Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University,  
Busan 46241, Republic of Korea

(Received May 02, 2018; Revised June 13 2018; Accepted June 13 2018)

**요약:** 이 연구는 에틸렌-비닐아세테이트(Ethylene-vinyl acetate, EVA) 공중합체 수지를 기본으로 하여 가교제, 발포제의 조성물과 함께 전도성을 가지는 다중벽 탄소나노튜브(Multiwall Carbon Nanotubes, MWCNT), 유리비드(glass beads)를 이용하여 전도성 EVA 발포체를 제조하였다. 다중벽 탄소나노튜브의 양, 혼련시간, 유리비드의 양 및 크기에 따른 전기전도성 및 발포체의 물성을 측정하였으며, 다중벽 탄소나노튜브의 양에 따라 전기전도성이 증가하였다. 또한 유리비드의 양에 따라 전기전도성이 증가된 것을 보아 유리비드가 다중벽 탄소나노튜브의 분산성을 향상시키는 것을 알 수 있다. 유리비드를 통한 다중벽 탄소나노튜브의 에틸렌-비닐아세테이트내의 분산성 향상을 통해서 에틸렌-비닐아세테이트 전도성 발포품을 성공적으로 만들 수 있을 것으로 기대된다.

**Abstract:** In this study, conductive EVA foams including multi-wall carbon nanotubes (MWCNT), glass beads were prepared. The electrical conductivity and physical properties of the foams were confirmed with varying amount of MWCNT, mixing time, and amount of glass beads. The electrical conductivity increased with the amount of MWCNT. Dispersivity of MWCNT in EVA foams were improved with glass beads. It can be suggested that conductive EVA foams can be successfully prepared with improved dispersivity of MWCNT in ethylene-vinyl acetate by using glass beads.

**Keywords:** MWCNT, conductive EVA foams, glass bead, dispersivity

#### 1.

전도성 발포품은 정전기 차폐용 물질로서 반도체 웨이퍼공정 자동차내장재, 연료탱크등에 사용된다. 전도성 발포체는 기존에는 카본블랙을 사용하여 제조 하였지만 최근에는 탄소나노튜브를 이용하여 전도성 발포체를 제조한다. 이는 기존의 카본블랙을 사용하는 방법보다 제조공정이 단순하고, 제조완료된 전도성 발포품에 대한 물리/화학적 외력에 의한 내구성이 뛰어나도 또한 카본블랙을 포함하는 전도성 발포체에 비하여 표면저항 값이 작아 정전기에 대한 우수한 전도성을 갖고, 탄소나노 튜브를 포함하는 발포체에 내마모성을 부여할 수 있다.

탄소나노튜브는 우수한 기계적 강도와 전기전도도

및 열전도도를 동시에 가지지만 탄소나노튜브는 그 자체로도 디스플레이분야, 연료전지 등 에너지 분야 소재로의 사용이 연구되고 있지만, 도전성이나 기계적 특성을 발현시키기 위해서는 미세분말 상태인 구조적인 특성으로 인해 그 자체만으로는 특성 발현이 어렵고, 반드시 기지재료나 기판 등 다른 소재와 함께 복합화하는 것이 요구된다. 그러나 탄소나노튜브를 고분자에 혼성화 시킨 고분자 나노복합체를 제조할 경우 탄소나노튜브가 분자간 힘인 van der waals 힘과 같은 표면인력에 의한 응집력이 강하기 때문에 고분자와의 결합력이 낮아져 특유의 우수한 물성을 나타내지 못하고, 비극성 고분자에는 분산성이 매우 낮아진다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 연구가 화학적으로나 물리적 방법으로 많이 진행되고 있는데 주로 탄소나노튜브의 표면을 개질하는 방법이 사용되고 있다. 화학적 개

<sup>†</sup> Corresponding author:: ildoo Chung (idchung@pusan.ac.kr)

질은 유기화 부분을 탄소나노튜브 표면에 처리함으로써 탄소나노튜브와 고분자 간의 계면 결합력을 향상시키는 방법으로 산처리를 통해 고분자의 주사슬과 유사한 구조를 가지는 기능기를 도입하여 상용성을 향상시킨다. 그러나 이 방법은 탄소나노튜브의 표면 파괴를 이용하게 되어 본래의 특성이 저하되는 문제점이 있다.[1-4] 이와 반대로 물리적 개질 방법은 탄소나노튜브 본래의 물성은 유지할 수 있으나 고분자와의 결합력이 화학적인 개질 방법에 비해 떨어져 분산이 효과적이지 못한 단점이 생기기도 한다. 최근에는 공유결합이 아닌 이온결합을 이용하여 탄소나노튜브 자체의 물성을 유지하면서 고분자와의 결합력을 향상시키고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다[5-8].

충진용 글라스비드는 유리로 이루어진 작은 구형이기 때문에 빛에 투명하며, 물이나 약품에 강하고 비교적 고온에 잘 견디는 뛰어난 특성을 발휘한다. 그리고 무방향성이기 때문에 플라스틱의 경우 성분을 균일하게 분산시키며 성형품의 수축변형을 적게 하고 지수를 안정시킨다[9].

이 연구에서는 소량만으로도 높은 전기전도도를 발현하는 다중벽 탄소나노튜브(Multiwall Carbon Nanotubes, MWCNT)와 MWCNT의 분산성 향상을 위한 유리비드를 에틸렌-비닐아세테이트(ethylene-vinyl acetate, EVA)/MWCNT 복합체에 첨가하여 발포체를 제조하였다. 에틸렌-비닐아세테이트/MWCNT 복합체 및 발포체와 에틸렌-비닐아세테이트/MWCNT/유리비드 발포체의 전기전도성 및 물성을 측정하였다.

## 2.

### 2.1.

탄소나노튜브는 (주)한화나노텍에서 제조된 직경 10~20 nm, 길이 10~50 μm에 Thermal CVD공법으로 제조된 순도 95%이상 급 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)를 사용하였다. 직경 1~25 μm, 75~150 μm의 유리로 이루어진 구형의 (주)바이넥스에서 제조된 글라스비드(JFL-2000, JB-200)를 사용하였다. ethylene vinyl acetate 수지는 한화 케미칼에서 제조된 EVA 1317을 사용하였다. 디큐밀퍼옥사이드(Dicumyl peroxide)와 발포제로 (주)금양에서 제조된 Cellcom JTR을 사용하였다. 또한 가공식 첨가제로서 (주)한일화학에서 제조된 고무용 2호 산화아연(ZincOxide)과 (주)LG화학에서 제조된 스테아린산(stearic acid)을 사용하였다.

### 2.2. EVA/MWCNT

EVA를 다중벽 탄소나노튜브 나노복합체를 제조하기 위해 독일 HAAKE사의 model 001-7775 Rheocord 9000을 사용하여 rotor speed 200 rpm, mixing time 5 min으로 120°C에서 혼련하고 본 mixing에서 MWCNT, Glass beads를 투여하여 rotor speed 200 rpm, 본 mixing 5, 10, 15, 20 min으로 혼합한다. 이와 같이 동일한 방법으로 얻어진 compound를 제조하였다.

### 2.3. EVA/MCNT

EVA/MWCNT 복합체를 디큐밀퍼옥사이드 (dicumylperoxide) 5 min간 open-roll mill로 첨가한다. 가교제가 첨가된 compound를 mold 크기에 맞게 자른 후

Table 1. Formulation of MWCNT in EVA.

Trial	REF	1	2	3	4	5
EVA1317				100		
MWCNT	0	1	3	5	7	9
Glass beads	-	-	-	-	-	-
DCP(99%)				1.0		
JTR	1.5	1.5	2.0	2.3	2.5	2.6
Premixing(min)				5		
Mixing(min)				15		
Roll mill(min)				5		
성형 조건				170°C×5 min		
Properties						
Mooney viscosity	0.62	0.85	1.03	1.34	1.60	1.76
Electrical conductivity (S/cm)	>E-14	1.48E-13	2.59E-13	5.89E-12	1.48E-08	3.78E-08
Sp. Gr.	0.661	0.655	0.663	0.667	0.672	0.664
Hd	80	81	82	85	85	86
Tb(kgf/cm <sup>2</sup> )	62.4	66.2	68.6	69.8	71.1	71.2
Eb(%)	350	340	330	330	330	320
Tr(kgf/cm)	50.7	51.6	51.9	52.7	53.4	53.5

mold에 넣고 170°C의 온도와 150~155 kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 유압식 가열 프레스를 이용하여 5 min간 compression molding한 후 고온/고압 하에서 5 min동안 compression mold-ing하여 압력을 제거하여 발포시켰다.

2.4.

인장강도, 인장응력 및 신장률은 시편을 KS M 6518에 준하여 3mm내외의 두께로 아령형 시험편을 제작하였다. UTM(Universal testing machine)을 사용해 인장강도, 인열강도, 신장율을 측정하였고 시험편은 5개로 최대값과 최소값을 제외한 나머지 값의 평균을 취하였다. 인열강도는 고무 시편을 KS M 6518에 준하여 두께 2.3~2.8mm의 두께로 시험편을 제작하였다. UTM(Universal testing machine)을 사용해 인열강도를 측정하였고 시험편은 5개로 최대값과 최소값을 제외한 나머지 값의 평균을 취하였다. 경도는 KS M 6518에 준하여 Fig 1. 과 같은 스프링식 경도 시험기(쇼어형 경도 시험기) Asker C type의 경도계로 측정하였다. 시편의 두께는 각각 12mm 이상으로 5회 반복 측정 후, 평균값을 sheet skin층의 경도로 하였다. 무늬점도는 KS M ISO 289-1 규격에 준하여 100±0.5°C에서 4분간 ML(1+4)를 측정하였다. 전기전도성은 ASTM D257 규격에 준하여 각 시편 두께는 최소 1.0mm 이상으로 반복 측정하였다.

3.

3.1. EVA/MWCNT MWCNT

동일 가공조건(rotor speed 200 rpm, 20 min, 120 °C)에서 MWCNT 함량에 따른 전도도 특성을 확인하고자 MWCNT의 함량을 1, 3, 5, 7, 9 phr을 각각 첨가하였다. 복합체의 제조는 아래의 순서로 시행하였다. 각 배합비에 따른 물리특성과 전기전도도 Table 1. 에서 확인할 수 있다.

탄소나노튜브 가 첨가된 고분자수지에서의 percolation threshold의 농도는 고분자수지의 종류, 탄소나노튜브의 종류에 따라 다양하다. percolation threshold 농도 이후의 전기전도성의 증가는 농도대비 완만하게 증가한다.[10] EVA에 MWCNT가 첨가된 수지의 percolation threshold 농도나 전기전도성에 관한 연구는 많이 진행되지 않았다. Fig 1. 에서 전기전도성이 MWCNT가 5 phr 이전까지는 거의 변화가 없고 5 phr 이상에서 부터 급격하게 증가 된 것으로 보아서 EVA/MW-CNT의 percolation threshold가 5 phr 로 확인되었고 7 phr에서 부터는 전기전도성이 일정해지는 것을 관찰 하였다. percolation threshold 지점에서 급격히 전도성이 커지고 전기전도성의 증가가 완만해지는 시점의 MWCNT의 농도를 최적의 농도로 결정하였고

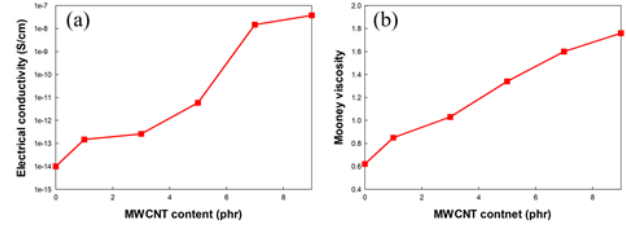


Figure 1. (a) Electrical conductivity and (b) mooney viscosity of EVA/MWCNT composites by MWCNT content.

이때의 전기전도도는 10<sup>-8</sup>~10<sup>-7</sup> S/cm. Fig 2. 에 MWCNT의 함량에 따른 물리적 특성의 변화를 나타내었다. MWCNT의 첨가에 따라 MWCNT/EVA복합체의 무늬점도가 0 phr에서 0.6을 나타내었으며 10 phr에서 2까지 증가 하였다. 이는 MWCNT와 고분자사이의 상호작용 증가로 인한 분자 간entanglement의 증가 때문에 무늬점도가 상승한 것으로 판단된다. MWCNT/EVA 복합체의 경도는 Asker C 기준으로 0 phr일 때 80에서 10phr 일 때 86까지 올라가는 것을 관찰 할 수 있었고, 인장강도는 MWCNT가 0 phr일 때 65 kg/cm<sup>2</sup> 10 phr일 때 71.2 kg/cm<sup>2</sup> 증가한 것이 관찰 되었다. 인열강도 또한 MWCNT가 0 phr일 때 50.7 kg/cm<sup>2</sup>에서 10 phr일 때 53.5 kg/cm<sup>2</sup> 으로 소폭 증가하였고, 연신파단율이 MWCNT가 0 phr일 때는 350%에서 10 phr 일때는 320%로 소폭감소 되었다. 연신파단율의 감소는 취성이 증가되었다고 볼수 있다. 또한 MWCNT가 EVA수지에 분산되어 인장강도, 인열강도 및 경도등의 전반적인 기계적강도를 향상시키는 것을 알 수 있다.

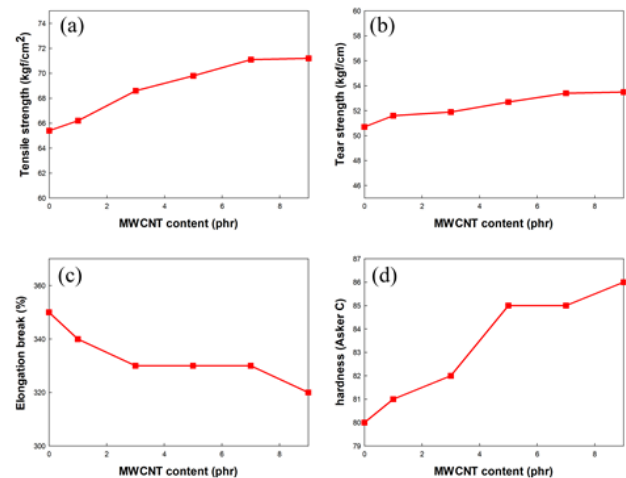


Figure 2. (a) Tensile strength, (b) tear strength, (c) elongation break, (d) hardness of EVA/MWCNT composites by MWCNT content.

**Table 2.** Formulation of mixing time in EVA form

Trial	6	7	8	9
EVA1317	100			
MWCNT	7	7	7	7
Glass beads	-	-	-	
DCP(99%)	1.0			
JTR	2.5			
Premixing(min)	5	5	5	5
Mixing(min)	5	10	15	20
Roll mill(min)	5	5	5	5
성형조건	170°C×5 min			
Properties				
Mooney viscosity	1.68	1.64	1.60	1.57
Electrical conductivity (S/cm)	1.46E-09	3.72E-09	1.48E-08	2.33E-08
Sp. Gr.	0.672	0.674	0.672	0.680
Hd	84	85	85	85
Tb(kg/cm <sup>2</sup> )	67.2	68.3	71.1	72.3
Eb(%)	310	320	330	330
Tr(kg/cm)	50.3	52.7	53.4	54.3

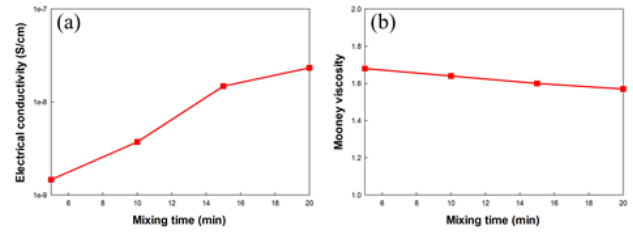
**3.2. EVA/MWCNT**

위 실험에서 EVA/MWCNT 복합체를 이용하여 제조한 발포체는 Table 2. 에 배합비와 물리적 특성을 나타내었다. Fig 3. 에서 보면 혼련시간이 증가할수록 전도성이 향상되었다. EVA/MWCNT 복합체의 혼련 시간에 따른 물리적 특성을 Table 2. 와 Fig 4. 에 나타내었다. 혼련시간이 증가에 따른 무늬점도 및 경도는 거의 유사하게 나타났다. 인장강도와 인열강도의 경우는 혼련시간이 증가함에 따라 소폭 증가하는 것으로 나타났는데 이것은 전술한 바와 같이 MWCNT의 분산성이 개선되면서 보강효과가 극대화된 것으로 판단된다.

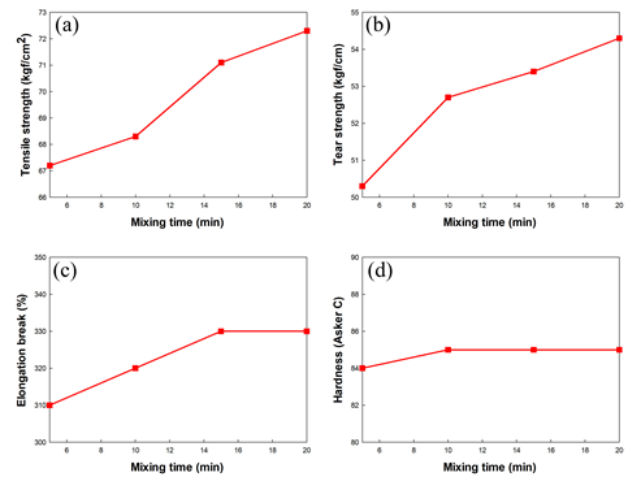
**3.3. EVA/MWCNT**

**(JFL-2000)**

MWCNT의 EVA 발포체내의 분산성을 향상시키기 위해 유리비드(1~45 μm)을 10, 20, 30, 40 phr을 각각 첨가하였다. 유리비드를 포함하는 EVA/MWCNT 발포체의 제조는 EVA/MWCNT 발포체와 발포조건을 동일하게 하였으며 유리비드는 MWCNT와 동시에 첨가하였다. Table 3. 과 Fig 5. 에 나타낸 바와 같이 glass beads 적용에 의해 EVA /MWCNT 복합체의 전도성이 향상되었다. 이것은 유리비드의 ball bearing effect와 관



**Figure 3.** (a) Electrical conductivity and (b) mooney viscosity of EVA/MWCNT composites foam by mixing time.



**Figure 4.** (a) Tensile strength, (b) tear strength, (c) elongation break, (d) hardness of EVA/MWCNT composites foam of EVA/MWCNT foam by mixing time.

계가 있다고 볼 수 있다. 즉, MWCNT의 응집현상을 회전하는 유리비드의 구형 입자 사이의 높은 전단력으로 인하여 제거하여 균일한 분산을 유도하기 때문으로 판단되며, 이는 향후실험을 통해 규명할 예정이다. 또한 유리비드 함량에 따른 전도도 변화를 살펴보면 유리비드의 함량이 20 phr에서부터 급격하게 증가하기 시작한다. 40 phr 첨가했을 경우 기존 배합 대비 약 10배 이상 전도도가 향상되었다. 유리비드 함량에 따른 무늬점도의 경우 10 phr 적용시 소폭 감소하다가 20 phr 이상에서는 점차 증가하는 것으로 나타났다.

유리비드함량에 따른 기계적 특성의 경우 함량이 증가함에 따라 점차 향상되는데 이것은 유리비드 첨가에 의해 EVA/MWCNT 복합체의 강성 향상에 기인한 것으로 판단된다. 따라서 유리비드를 첨가한 결과 전도도 및 물리적 특성의 향상되었다.

**3.4. EVA/MWCNT**

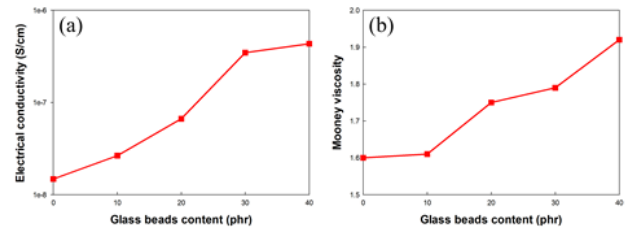
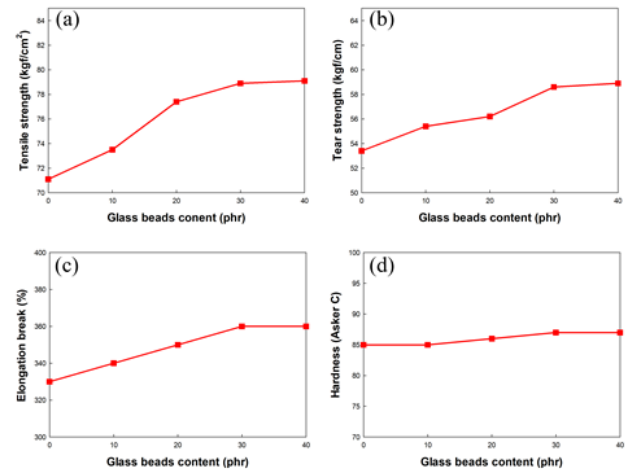
**(JB-200)**

유리비드의 직경에 따른 전기전도성 및 물성차이를 비교하기 위해 기존보다 직경이 큰 유리비드(75~

**Table 3.** Formulation of JFL-2000 content and particle size in EVA.

Trial	10	11	12	13
EVA1317	100			
MWCNT	7	7	7	7
Glass beads (JFL-2000)	10	20	30	40
DCP(99%)	1.0			
JTR	2.5	2.6	2.7	2.9
Premixing(min)	5	5	5	5
Mixing(min)	15	15	15	15
Roll mill(min)	5	5	5	5
성형조건	170°C×5 min			
Properties				
Mooney viscosity	1.55	1.73	1.75	1.91
Electrical conductivity (S/cm)	2.65E-08	6.66E-08	3.47E-07	4.33E-07
Sp. Gr.	0.672	0.674	0.672	0.680
Hd	85	86	87	87
Tb(kg/cm <sup>2</sup> )	73.5	77.4	78.9	79.1
Eb(%)	340	350	360	360
Tr(kg/cm)	55.4	56.2	58.6	58.9

150 μm)을 10, 20, 30, 40 phr을 각각 첨가하여 발포체를 제조하였다. Table 4. 과 Fig 7. 에 나타낸 바와 같이 유리비드 첨가에 의해 EVA/MWCNT 복합체의 전도성이 향상되었다. 유리비드 함량에 따른 전기전도도 변화를 살펴보면 유리비드의 함량이 증가함에 따라 전도도가 소폭으로 서서히 증가하다가 30 phr를 첨가 했을 때부터 급격하게 증가하였고 기존 배합 대비 약 10배 이상 전도도가 향상되었다. 상대적으로 입자의크기가 작은 JB-200이 20 phr에서 급격하게 전기전도성이 커진 반면에 JFL-2000은 30 phr에서부터 급격하게 전도 전도성이 커졌다. 이것은 유리비드의 입자 크기가 EVA/MWCNT 복합체에서 MWCNT의 분산성에 영향을 끼치는 것을 나타내는 것으로 결론적으로 입자크기가 작을수록 MWCNT의 분산에 효과적인 것으로 판단된다. Fig 8. 에 나타낸 바와 같이 무늬점도의 경우 10 phr에서 20 phr까지는 급격하게 증가하다가 20 phr에서 30 phr까지는 완만하게 증가하였고 30 phr 이상에서 다시 급격하게 증가하였다는 무늬점도가 증가하는 것으로 나타났다. 기계적 강도의 경우 JB-200의 함량이 증가함에 따라 점차 증가하는데 동일함량의 JFL-2000 적용 배합과 비교할 때 기계적 특성의 증가

**Figure 5.** (a) Electrical conductivity and (b) mooney viscosity of EVA/MWCNT/glass beads composites foam by glass beads(JFL-2000) content.**Figure 6.** Physical properties of EVA/MWCNT/glass beads composites foam by glass beads(JFL-2000) content.

폭이 다소 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 이전의 연구결과를 종합해 볼 때 glass beads 첨가시복합체의 강성의 증가로 기계적 특성의 증가 경향은 유사하나 입자크기에 따라 MWCNT의 분산성의 차이로 인해 상대적으로 보강효과가 감소한 것으로 판단된다.

#### 4.

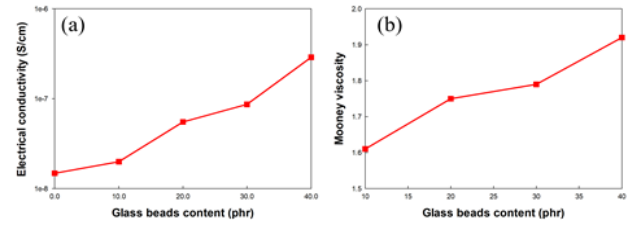
이 연구에서는 MWCNT/EVA 발포체를 제조하는 과정에서 중요시 되는 MWCNT의 분산성을 향상시키기 위하여 글라스비드를 적용하였다. 글라스비드의 입도 차이에 따라 JFL-2000과 JB-200 사이에서 전도성의 차이는 유리비드의 입자가 작을수록 우수하였다 두 유리비드 모두 전기전도성이 증가하는 경향을 낸 것으로 보아 MWCNT의 분산을 향상시키는 것을 확인할 수 있었다. 또한 글라스비드의 Ball bearing effect로 인하여 MWCNT 분자간의 얽힘을 해결하여 고른 분산이 이루어졌다고 판단하고 이로 인해 전도성 뿐만 아니라 글라스비드 첨가로 인한 강성 증가로 물성 보강효과도 관찰할 수 있었다. 이 연구는 에틸렌-비닐아세테이트(Ethylene-vinyl acetate, EVA)

**Table 4.** Formulation of JB-200 and particle size in EVA.

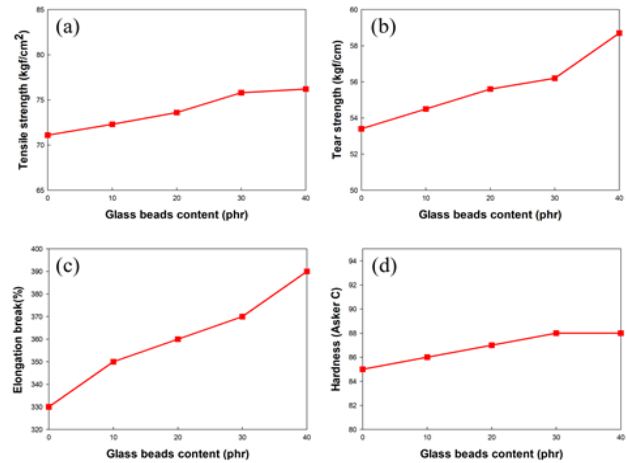
Trial	14	15	16	17
EVA1317	100			
MWCNT	7	7	7	7
Glass beads (JB-200)	10	20	30	40
DCP(99%)	1.0			
JTR	3.0	3.3	3.5	3.9
Premixing(min)	5	5	5	5
Mixing(min)	15	15	15	15
Roll mill(min)	5	5	5	5
성형조건	170°C×5 min			
Properties				
Mooney viscosity	1.61	1.75	1.79	1.92
Electrical conductivity (S/cm)	1.99E-08	5.51E-08	8.66E-08	2.89E-07
Sp. Gr.	0.681	0.677	0.684	0.688
Hd	86	87	88	88
Tb(kg/cm <sup>2</sup> )	72.3	73.6	75.8	76.2
Eb(%)	350	360	370	390
Tr(kg/cm)	54.5	55.6	56.2	58.7

공중합체 수지로 기본으로 하여 가교제, 발포제의 조성물과 함께 전도성을 가지는 다중벽 탄소나노튜브 (Multiwall Carbon Nanotubes, MWCNT), 유리비드(glass beads)를 이용하여 전도성 EVA발포체를 제조하였다. 다중벽 탄소나노튜브의 양이 5 phr이상으로 첨가되면 전기전도성이 급격하게 향상되었다. 이를 통해 MWCNT가 전기전도성을 향상시킨다는 것을 확인하였고 혼련시간이 증가함에 따라 전기전도성이 증가하므로 혼련시간이 MWCNT의 분산에 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 유리비드의 첨가에 따라 전기전도성 향상되었고 이는 유리비드가 MWCNT의 발포체 내의 분산성을 증가시키는 것으로 볼 수 있고 유리비드의 ball bearing effect에 의해 강성증가로 인한 물성 증가를 확인 할 수 있었다. 유리비드를 통한 다중벽 탄소나노튜브의 에틸렌-비닐아세테이트내의 분산성 향상을 통해서 에틸렌-비닐아세테이트 전도성 발포품을 효율적으로 만들 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 중소벤처기업부의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음. [S2596208, 불연1급 성능을 만족하는 다기능성 세라믹코팅 금속 천장 시스템 개발]



**Figure 7.** (a) Electrical conductivity and (b) mooney viscosity of EVA/MWCNT/glass beads foam by composite with JB-200 content.



**Figure 8.** (a) Tensile strength, (b) tear strength, (c) elongation break, (d) hardness of EVA/MWCNT/glass beads foam by composite with JB-200 content.

### References

1. M. Yudasaka, R. Kikuchi, T. Matsui, Y. Ohki, S. Yoshimura and E. Ota, *Appl. Phys. Lett.*, **67**, 2477, (1995).
2. IN-woo Jeong, *Rubber Technology*, **7**, 2,(2006).
3. J. H. Hafner, A. Thess, P. Nikolaev, A. G. Rinzler, D. T. Colbert and R. E. Smalley *NATO ASI Series, Series E: Appl. Sci.*, **316**, 19, (1996).
4. I. C. Park, M. Park, J. K. Kim, H. J. Lee and M. S. Lee, *Macromol. Res.*, **15**, 498, (2007).
5. F. H Gojny, J. Nastalczyk, Z. Roslaniec and K. Schulte, *Chem. Phys. Lett.*, **370**, 820, (2003).
6. J. H. Du, J. Bai and H. M. Cheng, *Express Polymer Letters*, **1**, 253, (2007).
7. A. Star, Y. Liu, K. Grant, L. Ridvan, J. F. Stoddart, D. W. Steurman, M. R. Diehl, A. Boukai, and J. R. Heath, *Macromolecules*, **36**, 553, (2003).
8. R. J. chen, Y. Zhang, D. Wang and H. Dai, *J. Am. Chem. Soc.*, **123**, 3838, (2001).
9. B. Kannan and B. Marko, *Small*, **1**, 180, (2005).
10. N. J. S. Sohi, S. Bhadra and D. Khastgir, *Carbon*, **49**, 1349, (2011).