

# 탄소나노섬유와 NiFe 분말을 함유한 전자기파 흡수 재료

박기연\* · 한재흥\*\* · 이상복\*\*\* · 김진봉\*\*\* · 이진우\*\*\* · 이상관\*\*\*

## Radar Absorbing Materials containing Carbon nanofibers and NiFe particles

Ki-Yeon Park, Jae-Hung Han, Sang-Bok Lee, Jin-Bong Kim, Jin-Woo Yi, Sang-Kwan Lee

### ABSTRACT

The main objective of this study is the development of microwave absorbers containing both dielectric and magnetic lossy materials. Carbon nanofibers (CNFs) were used as dielectric lossy materials and NiFe particles were used as magnetic lossy materials. Total twelve specimens for the three types such as dielectric, magnetic and mixed radar absorbing materials (RAMs) were fabricated. Their complex permittivities and permeabilities in the range of 2~18 GHz were measured using the transmission line technique. The parametric studies for reflection loss characteristics of each specimen to design the single-layered RAMs were performed. The mixed RAMs generally showed the improved absorbing characteristics with thinner matching thickness. One of the mixed RAMs, S09 with the thickness of 2.00 mm had the 10 dB absorbing bandwidth of 4.0 GHz in the X-band (8.2~12.4 GHz). It also showed very broad 10 dB absorbing bandwidth as wide as 6.0 GHz in the Ku-band (12.0~18.0 GHz) with the thickness tuning to 1.49 mm. The experimental results for selected several specimens were in very good agreements with simulation ones in terms of the overall reflection loss characteristics and 10 dB absorbing bandwidth.

**Key Words** : radar absorbing materials (RAMs), carbon nanofibers (CNFs), NiFe particles, complex permittivity and permeability, reflection loss.

### 1. 서 론

전자파 흡수체에 대한 많은 연구가 진행되고 있는 분야의 예로 스텔스 기술을 들 수 있다. 이것은 적의 레이더가 발생시키는 전자파를 흡수 또는 산란시켜 포착되지 않도록 하는 레이더 포착 면적 (RCS, radar cross section)을 감소시키는 핵심 기술이다. 스텔스 기술은 형상 (shaping)을 제어하는 방법, 능동/수동 소자 (active/passive element)를 이용한 기술과 손실재료를 첨가한 전자파흡수재료

(RAMs, radar absorbing materials)에 의한 연구가 있다 [1, 2].

현재까지 유전성 손실재료를 함유한 유전성 흡수체와 자성 손실재료를 함유한 자성 흡수체에 관한 많은 연구들이 진행되었다. 하지만 이들의 경우에는 치명적인 몇 가지 문제점들이 존재한다. 유전성 흡수체의 경우에는 비교적 두꺼운 정합 두께를 갖고, 협대역의 흡수 성능을 나타낸다. 또한 자성 흡수체의 경우에는 다량 (약 70wt% 이상)의 첨가로 인해 매우 무거운 경향을 나타내며, GHz 대역의 고주파수에서는 Snoek's limit 에 의해서 자성 손실이 급격히 저하되는 것으로 알려졌다. 최근 들어, 이러한 흡수체들의 단점을 보완하기 위한 유전성 및 자성 손실재가 함께 적용된 흡수체에 대한 연구들이 진행되고 있다. Che [3]는 탄소나

\* KAIST 항공우주공학과 대학원  
\*\* KAIST 항공우주공학과,  
교신저자(jaehunghan@kaist.ac.kr)  
\*\*\* 한국기계연구원 부설 재료연구소 복합재료그룹

노튜브 (MWNT) 내부에 Fe 를 화학적인 공정에 의해 삽입된 복합 분말을 제조하여 광대역 흡수체를 개발하였다. Saitoh [4]는 유전성의 titanium oxide 분말과 자성의 carbonyl iron 분말을 사용하여 광대역의 2 층형 흡수체를 제작하였다. He [5]는 유전성의 nanotitanium 분말과 자성의 micropowders (MMP) 을 사용하고 최적설계를 접목하여 광대역 흡수체에 대한 해석 및 실험적 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 유전성 및 자성 손실재를 함유한 전자파 복합재료 흡수재료의 제작, 설계 및 성능평가를 목표로 하고 있다. 전도성의 CNFs 를 유전성 손실재료로 사용하였고, 강자성의 submicron NiFe 분말을 자성 손실재료로 사용하였다. 전체 12 종류의 복합재료 시편을 제작하였다. 이들은 필러의 함량과 혼합비에 따라 3 가지 types (dielectric, magnetic, mixed RAMs)으로 분류되었다. 복합재료의 분산 특성을 확인하기 위해 mixed RAMs 의 단면을 관찰하였다. 전체 12 종류의 복합재료의 복소 유전율 및 투자율을 2~18 GHz 범위에서 측정하였다. 단층형 흡수체를 설계하기 위해 측정된 전자기적 물성과 다층형 매질에서의 투과 및 반사와 관련된 이론을 사용하여 매개변수 연구를 수행하였다. 마지막으로 실험적 검증을 위한 성능평가를 통해 해석적인 결과와 비교 및 고찰을 수행하였다.

## 2. 복합재료의 제작 및 전자기적 물성 측정

### 2.1 복합재료의 제작

본 연구에서는 유전성 손실재료로서 종횡비가 약 100 정도의 값을 지니며, 유전율 발현이 용이한 CNFs 를 선택하였다. Showa Denko (Japan) 사의 제품으로 vapor grown CNFs 이다. 평균 직경 (fiber diameter)은 150 nm, 평균 길이 (fiber length)는 10~20  $\mu\text{m}$ , 밀도 (density)는 2  $\text{g}/\text{cm}^3$  를 갖는다. 또한 자성 손실재료로서 강자성의 NiFe particles 을 사용하였다. NiFe wire 에 전기폭발법 (pulsed wire evaporation method)을 적용하여 submicron 크기의 NiFe particles 을 획득하였다. EDS (energy dispersive spectroscopy) 분석 결과, 획득한 NiFe 분말의 성분은 52 at% Ni 과 48 at% Fe 으로 나타났다.

전자기파 흡수 복합재료의 제작 절차는 다음과 같다. 먼저, epoxy 수지, 경화제, 손실재료를 포함한 혼합물을 준비한다. 60°C 를 유지한 중탕 조건에서 준비된 혼합물을 균질기를 사용하여 5000 rpm 의 속도로 약 20 분간 충분히 분산시킨다. 그

리고 혼합 과정에서 생성되어 혼합물에 포함된 air 와 gas 를 제거하기 위한 탈포 과정을 거친다. 이러한 과정은 진공 상태로 80°C 에서 약 20 분간 수행되었다. 그 후 120°C, 대기압 조건의 오토클레이브에서 2 시간 동안 성형되었다. 마지막으로 제작된 복합재료는 전자기적 물성 측정을 위해 toroid 형태 (inner diameter: 3 mm, outer diameter: 7 mm, thickness: 1.0 ~ 1.5 mm)의 시편으로 가공하였다.

전체 12 종류의 복합재료는 3 가지의 types 으로 분류되었다. 유전성 타입의 시편은 S01, S02, S03 으로 각각 표기하였고, 손실재료로서 CNFs 만 사용되었다. 이들의 함량비는 0.5, 1.0, 2.0 wt% 이다. 자성 타입의 시편은 S04, S05, S06 으로 각각 표기하였고, 손실재료로서 NiFe particles 만 혼합하였다. 이들의 함량비는 10, 30, 50 wt% 이다. 혼합형 타입의 시편은 6 종류가 제작되었다. 먼저 수지에 1.0 wt%의 CNFs 가 포함된 혼합물에 NiFe particles 을 추가로 각각 10, 30, 50 wt% 혼합한 복합재료를 제작하였고, 이들은 S07, S08, S09 로 표기하였다. 이것은 일정한 유전성 손실재료가 포함된 복합재료에 자성 손실재를 첨가하여 복소 유전율 및 투자율의 변화량을 살펴보기 위함이다. 또한 수지에 30 wt%의 NiFe particles 가 포함된 혼합물에 CNFs 을 추가로 각각 0.5, 1.0, 2.0 wt% 혼합한 복합재료를 제작하였고, 이들은 S10, S11, S12 로 표기하였다. 이것은 일정한 자성 손실재료가 포함된 복합재료에 유전성 손실재를 첨가하여 복소 유전율 및 투자율의 변화량을 살펴보기 위해 제작되었다.

Fig. 1 은 S09 시편의 단면에 대한 SEM 이미지를 나타낸다. CNFs 의 경우에 rod 형태로 상대적으로 소량으로 나타났으며, NiFe particles 은 함량이 상대적으로 다량인 관계로 국부적으로 응집된 영역을 나타내었으나 전체적으로 잘 관찰되고 있다. 따라서 CNFs 와 NiFe particles 을 함유한 복합재료 시편을 제작하더라도, 충분히 분산이 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

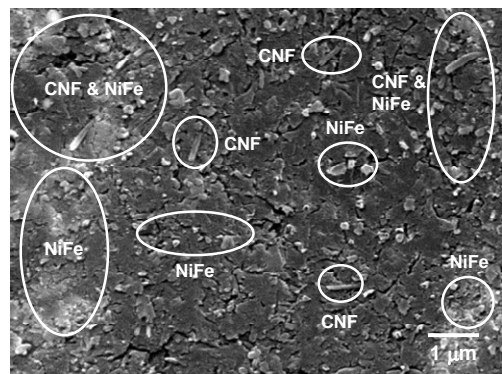


Fig. 1. SEM image for cross section of S09 specimen.

### 2.2 복소 유전율 및 투자율 측정

전송선로 기법 (transmission line technique)을 사용하여 복합재료의 전자기적 물성을 측정하였다. 회로 분석기 (Agilent N5230A)를 사용하여, 각각의 복합재료의 2~18 GHz 영역에서 S-parameters 를 측정하였다. 측정된 S-parameters 의 크기와 위상을 사용하여 복소 유전율과 투자율을 획득하였다.

유전성 RAMs (S01, S02, S03)의 경우에는 CNFs 함량이 증가함에 따라 복소 유전율은 증가하는 경향을 보였고, 이들의 실수항과 허수항의 전체 분포는  $[10 < \epsilon_r' < 17.5, 1.4 < \epsilon_r'' < 11.5]$ 로 나타났다. 비자성 체이므로 복소 투자율의 경우 거의 공기의 값을 나타내었다. 이로부터 CNFs 는 2.0 wt% 이하의 매우 작은 함량으로도 유전 손실을 발현할 수 있음을 알 수 있다. 자성 RAMs (S04, S05, S06)의 경우에는 NiFe 함량이 증가함에 따라 복소 유전율과 투자율은 증가하는 경향을 보였고, 복소 유전율의 실수항과 허수항의 분포는  $[2.9 < \epsilon_r' < 6.1, 0.1 < \epsilon_r'' < 0.4]$ 로 비교적 낮은 값을 알 수 있다. 하지만 복소 투자율의 경우에는 실수항과 허수항의 전반적인 분포는  $[\mu_r' < 1.5, \mu_r'' < 0.4]$ 로 향상된 결과를 보였다.

혼합 RAMs (S07, S08, S09)의 복소 유전율과 투자율 결과를 Fig. 2 와 Fig. 3 에 나타내었다. 또한 혼합 RAMs (S10, S11, S12)의 경우에도 복소 유전율과 투자율이 생성되었다. 이러한 6 종류의 혼합 RAMs 의 복소 유전율 및 투자율의 분포는  $[6.8 < \epsilon_r' < 28.5, 1.4 < \epsilon_r'' < 17.0]$ 와  $[\mu_r' < 1.5, \mu_r'' < 0.4]$ 로 유전성 및 자성 RAMs 과 비교하여 증가한 결과를 나타내었다.

## 3. 흡수체의 설계 및 성능평가

### 3.1 단층형 흡수체의 설계

일반적으로 N 층형 평면 매질에서 region i 와 region i+1 사이의 경계에서 일반 반사계수는 다음과 같이 정의된다.

$$\tilde{R}_{i,i+1} = \frac{R_{i,i+1} + \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{2ik_{i+1,z}(d_{i+1} - d_i)}}{1 + R_{i,i+1} \tilde{R}_{i+1,i+2} e^{2ik_{i+1,z}(d_{i+1} - d_i)}} \quad (1)$$

전력량 (power) 혹은 에너지 (energy)의 관점에서의 반사손실은  $RL [dB] = 20 \times \log_{10}(\tilde{R}_{i,i+1})$  로 표현된다. 또한 단층형 흡수체의 경우에 반사파를 최소화시키기 위해서, impedance matching condition 을 적용하였다 [1].

먼저, X-band (8.2~12.4 GHz) 대역에서의 12 종류 시편의 정합 두께를 찾고, 주파수 영역에서 반사 손실 특성을 예측하였다 (Table 1). 유전성 및 자성

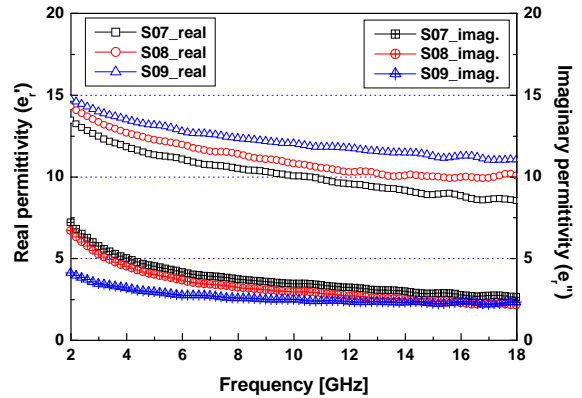


Fig. 2. Complex permittivities of S07, S08 and S09.

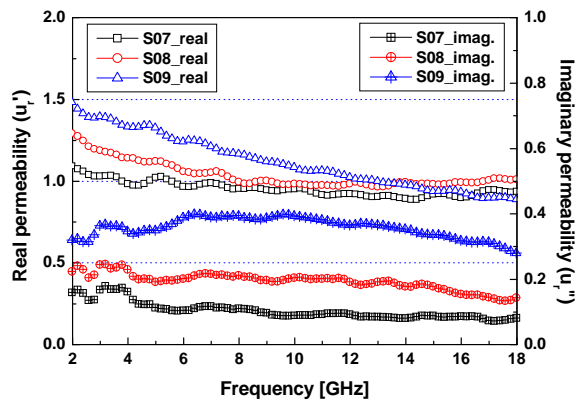


Fig. 3. Complex permeabilities of S07, S08 and S09.

Table 1. Matching thickness and reflection loss characteristics for each specimen in the X-band.

Specimen	Matching thickness [mm]	10 dB absorbing bandwidth [GHz]
S01	3.35	2.4 (9.0~11.4)
S02	2.73	3.4 (8.6~12.0)
S03	2.27	3.1 (8.5~11.6)
S04	13.9	0.0
S05	11.2	1.1 (8.9~11.0)
S06	2.80	3.3 (8.5~11.8)
S07	2.47	3.6 (8.4~12.0)
S08	2.27	3.5 (8.6~12.1)
S09	2.00	4.0 (8.2~12.2)
S10	2.68	4.0 (8.4~12.4)
S11	2.07	3.2 (8.3~11.5)
S12	1.60	0.0

RAMs 에 비하여 혼합 RAMs 의 경우 상대적으로 얇은 두께로 보다 넓은 흡수 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 혼합 RAM S09 는 2.0 mm 의 두께로 약 4.0 (8.2~12.2) GHz 의 10dB 흡수 대역을 나타내었다. 마찬가지로, Ku-band (12.0~18.0 GHz) 대역에서의 12 종류 시편의 정합 두께를 찾고, 주파수 영역에서 반사 손실 특성을 예측하였다. 각 type 에서 정합 두께가 얇고 우수한 흡수성능을 나

타내는 결과를 Table 2 에 나타내었다. X-band 결과와 흡사하게 S02, S06, S09, S10 의 복합재료가 얇은 두께로 상대적으로 넓은 흡수 성능을 나타내었다. 혼합 RAM S09 는 1.49 mm 의 두께로 Ku-band 전체 영역에서 10 dB 흡수 성능을 나타내었다.

**Table 2.** Matching thickness and reflection loss characteristics for each specimen in the Ku-band.

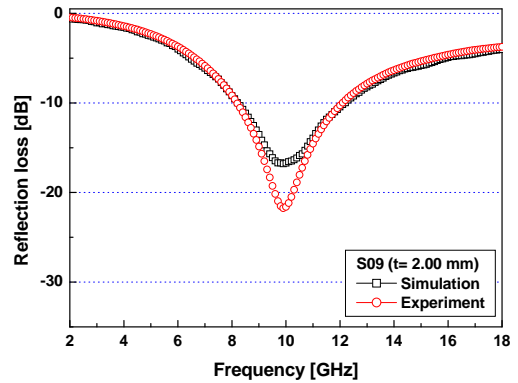
Specimen	Matching thickness [mm]	10 dB absorbing bandwidth [GHz]
S02	1.93	5.1 (12.7~17.8)
S06	2.03	5.6 (12.4~18.0)
S09	1.49	6.0 (12.0~18.0)
S10	2.00	6.0 (12.0~18.0)

**3.2 흡수체의 제작 및 반사손실 측정**

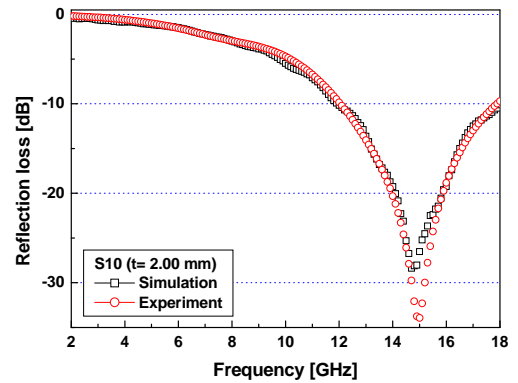
마지막으로 설계한 흡수체를 제작하여 성능평가를 위해 반사손실을 측정하였다. X-band 대역에서는 혼합 RAM S09 를, Ku-band 대역에서는 혼합 RAM S10 을 선택하였다. 제작된 시편은 설계 두께로 가공하고, 배면에 silver paste 를 바르고 Al 평판을 접합함으로써 흡수 성능을 측정을 위한 시편을 완성하였다. 회로 분석기를 사용하여 2~18 GHz 영역에서 반사손실 (S11 [dB])을 측정하였다. Figs. 4 와 5 는 S09 와 S10 의 예측 및 실험 결과를 보여준다. 실험 결과는 해석 결과와 비교하여 전체적인 경향 및 10 dB 흡수대역 관점에서 상당히 일치하는 결과를 나타내고 있다.

**4. 결론**

본 연구에서는 유전성 손실재, CNFs 와 자성 손실재, NiFe particles 을 함유한 전자파 복합재료 흡수재료의 제작, 설계 및 성능평가를 수행하였다. 전체 12 종류의 복합재료 시편을 제작하였고, 전자기적 물성을 측정하였다. 단층형 흡수체 설계를 위한 매개변수 연구를 수행하였으며, X-band 와 Ku-band 에서의 반사손실 특성을 예측하였다. 혼합 RAM S09 는 2.0 mm 의 두께로 약 4.0 GHz 의 10dB 흡수 대역을 나타내었고, 1.49 mm 의 두께로 Ku-band 전 영역에서 10 dB 흡수 성능을 나타내었다. 혼합 RAMs 의 경우 얇은 두께로 우수한 흡수 성능을 나타내고 있다. 이로부터 전자기파 흡수 재료가 일정 이상의 복소 유전율을 가지고 있을 때, 여기에 추가적으로 미세한 복소 투자율의 증가는 상대적으로 얇은 두께로 향상된 흡수 성능을 가질 수 있음을 알 수 있다. 마지막으로 반사손실 측정을 통해 설계한 흡수체들의 성능평가를 성공적으로 수행하였다.



**Fig. 4.** Simulation and experimental results for reflection loss of S09 in the X-band.



**Fig. 5.** Simulation and experimental results for reflection loss of S10 in the Ku-band.

**후 기**

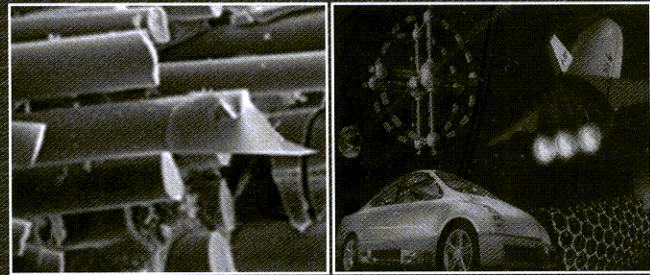
본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소 기본연구사업 “전자기 특성 제어 복합 소재 성형기술”과 산업자원부 소재원천기술개발사업 “전자파흡수 고각형비 극미세 금속입자 복합화 기술”의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

**참고문헌**

- (1) K.-Y. Park, S.-E. Lee, C.-G. Kim and J.-H. Han, “Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures,” *Compos. Sci. Technol.* 66, 2006, pp. 576-584.
- (2) 박기연, 이상복, 김진봉, 이진우, 이상관, 한재홍, “무전해 도금을 이용한 금속 코팅된 탄소나노섬유의 제조 및 미세조직,” *한국복합재료학회지*, 제 20 권, 제 5 호, 2007, pp. 43-48.
- (3) R. Che, L. Peng, X. Duan, Q. Chen and X. Liang, “Microwave absorption enhancement and complex permittivity and permeability of Fe encapsulated within carbon nanotubes,” *Adv. Mater.* 16, 2004, pp. 401-405.
- (4) M. Saitoh, T. amamoto, H. Okino, M. Chino and M. Kobayashi, “Double-layer type microwave absorber made of magnetic-dielectric composite material,” *Mat. Res. Innov.* 5, 2002, pp. 208-213.
- (5) Y. He, R. Gong, Y. Nie, H. He and Z. Zhao, “Optimization of two-layer electromagnetic wave absorbers composed of magnetic and dielectric materials in gigahertz frequency band,” *J. Appl. Phys.* 98, 2005, 084903: pp.1-5.

2008年

# 春季學術發表大會 論文集



■ 주최 : 사단법인 한국복합재료학회

■ 후원 : 한국과학기술단체총연합회

한국학술진흥재단

서울대학교 패션신소재 연구센터

서울대학교 지능형텍스타일시스템 연구센터

- 일시 : 2008년 4월 18일 (금)

- 장소 : 서울대학교 엔지니어하우스

# 목 차

<b>제 1 발표장</b>		
<b>09:00~10:40</b>	<b>구조해석 및 설계 (I) (Structural Analysis and Design I)</b>	<b>좌장: 이우일</b>
09:00~09:20	The Effect of a Large Hole on the Stress Concentration Factor of a Satellite Hole MSD Jacob*, S. J. Kim (서울대) -----	33
09:20~09:40	1kW급 소형 풍력발전기 블레이드 구조 해석 및 구조 시험 평가 박현범*, 공창덕, 최수현 (조선대), 서영택 (서영테크) -----	37
09:40~10:00	복합재 하이브리드 조인트의 강도예측 최진호*, 임도완, 반창수, 권진희 (경상대), 이영환 (한양대) -----	41
10:00~10:20	역지끼워맞춤을 갖는 복합재료 단일 겹치기 리벳 체결의 단순 모델링을 활용한 강도 예측 윤태호*, 김승조 (서울대) -----	46
10:20~10:40	헬리콥터 착륙장치를 위한 복합재 토크링크 설계 연구 이상용*, 김진봉, 엄문광 (한국기계연구원), 김태욱, 신정우 (한국항공우주연구원) -----	50
10:40~11:00	Coffee Break	
<b>11:00~11:30</b>	<b>특별 강연</b>	<b>좌장: 장정식</b>
<b>11:30~12:00</b>	<b>개회식</b>	<b>사회: 박승업</b>
<b>13:20~15:00</b>	<b>구조해석 및 설계 (II) (Structural Analysis and Design II)</b>	<b>좌장: 김지환</b>
13:20~13:40	축소형 복합재 Wind Turbine Blade 의 동적거동 분석 방형준*, 신형기, 김석우 (한국에너지기술연구원), 전영준 (DACC) -----	55
13:40~14:00	열경화성 Prepreg의 Thermoforming 공정변수에 대한 실험적 연구 이진우*, 김병기, 엄문광 (한국기계연구원), 황경정, 이건영, 김태곤 (대한항공) -----	59
14:00~14:20	교점계수법에 의한 섬유배향각 측정 김진우*, 이동기 (조선대) -----	64
14:20~14:40	Compression molding 과정에서 weld lines의 지점에 대한 해석적 방법의 연구 김지환, Girardot Thomas*, 이우일, 한우석 (서울대) -----	69
14:40~15:00	Analysis of Elastic Field in a Panel of Angle-Ply Laminate by Displacement Potential Approach A.M. Alsar*, Y. Q. Wang, Y. Shi, J. I. Song(창원대), N. M. L. Huq(DUET) -----	75
15:00~15:20	Coffee Break	
<b>15:20~17:00</b>	<b>복합재료제조공정 (Composite Materials Manufacturing Process)</b>	<b>좌장: 김천곤</b>
15:20~15:40	전자파 흡수용 중공 자성 섬유 제조 및 분산 특성 평가 이진우*, 이상복, 김진봉, 이상관 (한국기계연구원) -----	79
15:40~16:00	탄소나노섬유와 NiFe 분말을 함유한 전자기파 흡수 재료 박기연*, 한재홍 (KAIST), 이상복, 김진봉, 이진우, 이상관(한국기계연구원) -----	83
16:00~16:20	고이득 및 광대역 특성을 갖는 지능형 안테나 구조물의 제작 및 실험 문태철*, 황윤봉 (포항공대) -----	87
16:20~16:40	단방향 섬유 다공성 매질 안 유동에서 미세입자 필터링 현상에 대한 연구 염상혁*, 김지환, 이우일 (서울대), 박종만 (경상대), 박종규 (국방과학연구원) -----	91
16:40~17:00	샌드위치 복합재 구조물 손상 크기에 따라 구조물에 끼치는 영향 평가 박현범*, 공창덕, 김상훈(조선대), 송인수 (한국화이버) -----	95
<b>17:20~19:00</b>	<b>간담회 및 논문상 시상</b>	