

## 그래핀이 포함된 나노유체의 열전도도 특성에 대한 연구

박성식\*, 전용한\*\*, 김남진\*\*\*<sup>†</sup>

\*제주대학교 에너지공학과(pss5153@jejunu.ac.kr), \*\*상지영서대학교 소방안전과(kcv76@hanmail.net),  
\*\*\*<sup>†</sup> 제주대학교 에너지공학과(jnkim@jejunu.ac.kr)

### A Study on the Characteristics of the Thermal conductivity of Nanofluids Containing Graphene

Park, Sung-Seek\* Jeon, Youn-Han\*\* Kim, Nam-Jin\*\*<sup>†</sup>

\*Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(pss5153@jejunu.ac.kr),  
\*\*Dept. of Protection and Safety, Sang Gi Young Seo College(kcv76@hanmail.net)  
\*\*\*<sup>†</sup> Dept. of Energy Engineering, Jeju National University(jnkim@jejunu.ac.kr)

#### Abstract

A nanofluid is a fluid containing suspended solid particles, with sizes on the order of nanometers. Especially graphene nanoparticle that has the high thermal conductivity properties among the various nanoparticles added to the nanofluid is receiving attention. Graphene is a flat monolayer of  $sp^2$ -bonded carbon atoms tightly packed into a honeycomb lattice. And are known to have very high thermal conductivity. Therefore, we compared thermal conductivity with viscosity of graphene M-5 nanofluids and graphene M-15 nanofluids. Graphene M-5 and graphene M-15 have different average particle diameters and the other properties are the same. Two kinds of graphene nanofluids was examined by measuring thermal conductivity via transient hot-wire method. And the viscosity was measured by using a rotational digital viscometer. As a result, graphene M-5 nanofluids exhibited better thermal conductivity and viscosity than graphene M-15 nanofluids.

Keywords : 그래핀(Graphene), 나노유체(Nanofluid), 열전도도(Thermal conductivity), 점도(Viscosity), 분산(Dispersion)

#### 1. 서 론

기본유체보다 높은 열전달 특성을 가지고 있는 나노유체는 순수 유체 내에 열전도도가 우수한 nm 크기의 고체입자들이 안정적으로

부유되어 있는 새로운 개념의 유체이다.<sup>1)</sup> 최근 나노유체에 첨가되는 여러 가지 나노입자들 중에서 높은 열적특성을 나타내는 그래핀 나노입자가 주목을 받고 있다.

그래핀은  $sp^2$  결합에 의해 탄소 원자들이 2차원

Submit date : 2012. 11. 17, Judgment date : 2012. 11. 24, Publication decide date : 2012. 12. 21  
Communication : Kim, Nam-Jin(jnkim@jejunu.ac.kr)

상에서 벌집모양의 배열을 이루고 있는 원자 한층을 명명한다. K. S. Novoselov et al.이 처음으로 흑연에서 그래핀을 분리한 이래로 그래핀은 구조적, 화학적으로 매우 안정하고 뛰어난 열전도도와 전도체로서의 특징을 갖고 있다고 보고되었다.<sup>2)3)4)</sup> 따라서 그래핀을 이용한 나노유체를 제조하여 열교환 시스템의 작동유체로 이용하고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다.

Wei Yu et al.은 에틸렌 글리콜(Ethylene Glycol, EG)을 기반으로 한 그래핀 나노유체의 열전도도를 측정하여 5.0 vol%의 혼합비율에서 86%의 열전도율이 증가한다고 보고하였다.<sup>5)</sup> S. S. Gupta et al.은 온도에 따른 그래핀 나노유체의 열전도도를 측정하였고, 그래핀 나노유체의 열전도도 증가는 탄소나노튜브 나노유체와는 다르게 온도에 의존한다고 보고하였다<sup>6)</sup>. 그리고 나노입자의 형상은 나노유체의 열전도도 증가에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>7)8)</sup> 최근 Do et al.은 나노유체에 첨가한 나노입자의 크기가 증가함에 따라 히트파이프의 열성능이 향상된다고 보고하였다<sup>9)</sup>. 그러나 그래핀 입자의 직경에 따른 그래핀 나노유체의 열전도도 특성에 대한 연구결과는 아직 보고되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 평균 입자 직경은 다르고 나머지 물성치는 같은 두 종류의 그래핀을 이용하여 그래핀 나노유체를 제조하였으며, 이 두 종류의 그래핀 나노유체에 대한 열전도도 및 점도 특성을 비교분석 하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

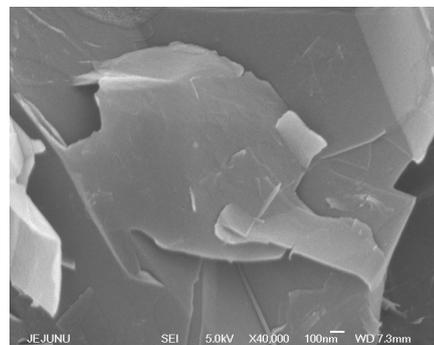
### 2.1 그래핀의 나노유체 제조

Table 1에 본 연구에서 사용된 그래핀의 물성치를 나타내었다. 그래핀은 grade M-5와 grade M-15 두 종류를 사용하였다. 이 두 종류의 그래핀은 평균 두께, 탄소 함유량, 밀도, 열전도도 등 동일한 물성을 가지고 있으며, 평균 입자 직경만 다른 특징을 나타낸다.

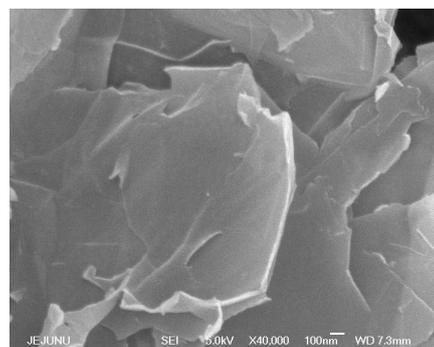
본 연구에서 사용된 M-5와 M-15 그래핀

Table 1. Properties of Graphene M-5 and M-15.

Properties	M-5	M-15
Average particle diameter( $\mu\text{m}$ )	5	15
Average particle thickness(nm)	6-8	6-8
Carbon content (%)	>99.5	>99.5
Bulk Density( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0.03-0.1	0.03-0.1
True density( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2.2	2.2
Thermal conductivity( $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ )	3000	3000
Surface Area( $\text{m}^2/\text{g}$ )	120-150	120-150



(a) Graphene M-5



(b) Graphene M-15

Fig. 1. SEM photos of graphene.

의 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진을 Fig. 1에 나타내었다. 사진을 보면 알 수 있듯이 2차원적 구조를 가진 그래핀은 얇은 판 모양을 하고 있음을 볼 수 있으며, 같은 판

소동소체인 탄소나노튜브와 마찬가지로 입자와 입자간의 반데르발스 상호 작용으로 인하여 응집체 형태를 이루고 있음을 알 수 있다.

대부분의 나노소재를 이용하여 나노유체를 제조할 때 가장 큰 문제점은 나노소재와 유체를 단순혼합해서는 유체 내에 나노입자들이 안정적으로 부유가 되지 않는다는 것이다. 따라서 본 연구에서는 그래핀 나노유체의 분산 안정성 확보를 위하여 초음파 분산기를 이용하였다. 기본유체는 1차 증류수를 사용하였고, 그래핀 입자와 기본유체를 0.001 ~ 0.1 vol%의 비율로 각각 혼합하고, 2시간 동안 초음파 분산기로 분산하여 그래핀 나노유체를 제조하였다.

### 2.1 열전도도 측정

Fig. 2는 휘트스톤 브릿지(Wheatstone Bridge)를 이용하여 구성한 열전도도 측정 실험장치의 개략도이다. 본 연구에서는 그래핀 나노유체의 열전도도를 측정하기 위하여 비정상 열선법(Transient Hot-wire Method)을 이용하였다. 또한 CRC Handbook of Chemistry and Physics에 보고된 증류수의 열전도도 데이터와 본 실험 장치를 이용하여 측정된 증류수의 열전도도를 비교한 결과 1% 이내의 편차로 실험 데이터가 일치하였다<sup>10)</sup>. 실험장치는 백금선의 저항변화를 측정할 수 있는 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge)와 전압을 공급해 주기 위한 파워 서플라이, 데이터의 수집과 저장을 위한 Agilent 34970A 데이터 로거(logger)와 컴퓨터로 구성되어 있다. 휘트스톤 브리지는 직경 76 μm, 길이 15 cm 백금선(R4)과 10 Ω(R2), 10 kΩ(R1)의 저항 그리고 브리지의 검류계에 걸리는 전압을 0으로 만들어주기 위한 10 kΩ의 가변저항(R3)으로 구성되어 있다.

열전도도 측정실험은 다음과 같이 수행하였다. 제조된 그래핀 나노유체 50 ml가 들어 있는 매스실린더에 백금선이 연결된 측정 장

치를 넣고, 항온수조를 이용하여 그래핀 나노

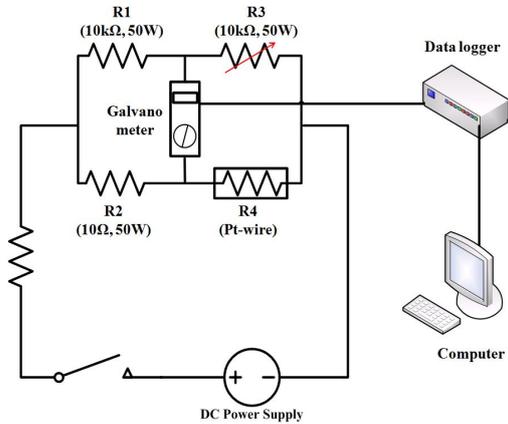


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental apparatus.

유체의 온도를 실험온도인 25°C로 평형 시킨다. 그리고 휘트스톤 브리지의 가변저항 10 kΩ을 조절하여 검류계(galvano meter)의 전압을 0으로 만든 뒤, 휘트스톤 브리지 회로에 DC 15V를 인가시켜 변화하는 백금선의 저항을 측정하였다. 그리고 Bentley가 제시한 백금선의 전기저항-온도에 관한 선형식 (1)을 이용하여 백금선의 저항을 온도로 환산하였다<sup>11)</sup>. 여기서,  $E_{th}$ 는 검류계로 측정된 전압이며,  $V_s$ 는 직류전원공급기의 인가전압,  $T$ 는 백금선의 온도이다.  $R$ 은 온도  $T$ 에서의 백금선 저항이고,  $R_0$ 는 0°C에서 백금선의 저항,  $\alpha$ 는 백금선의 온도-저항계수로 0.0039092/°C이다.

$$E_{th} = V_s \left( \frac{R_{pt}}{R_{pt} + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_3} \right) \quad (1)$$

$$R = R_0 (1 + \alpha dT)$$

위 식 (1)의 백금선의 전기저항-온도에 관한 선형식을 이용하여 계산된 온도를 Nagasaka<sup>12)</sup>가 제안한 열선의 온도 변화식을 이용하여 최종적으로 그래핀 나노유체의 열전도도를 계산하였다

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

여기서, k는 유체의 열전도도이며, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>는 각각 시간 t<sub>1</sub>, t<sub>2</sub>에서 측정된 백금선의 온도이다.

비정상 열전법을 이용한 나노유체의 열전도도 측정 시 백금선 표면에 나노입자가 흡착되는 현상이 발생하며, 이러한 현상으로 인해 열전도도 측정실험의 정확성이 떨어진다. 따라서 본 연구에서는 흡착현상으로 인해 열전도도가 잘 측정되지 않는 현상을 방지하기 위하여 매 실험마다 초음파 세척기를 사용하여 백금선을 충분히 세척하였다. 모든 실험은 유체의 실험온도를 상온(25°C)으로 일정하게 유지하여 실시하였고, 실험의 정확도와 신뢰성을 높이기 위하여 동일한 실험조건에서 10번의 반복실험을 수행하였다. 측정된 결과는 동일 실험조건에서 측정된 기본유체의 열전도도와 비교하여 기본유체 대비 열전도도 증가비율로 나타내었다.

### 2.2 점도 측정

그래핀 나노유체의 점도는 회전형 디지털 점도계 DV II+pro를 이용하여 측정하였다. DV II+pro는 회전 추의 회전수를 0 ~ 200 rpm까지 조절할 수 있고, 시료용액의 전단율을 일정하게 유지시킬 수 있기 때문에 뉴턴유체와 비 뉴턴유체의 측정에 모두 유용하다. 점도 측정 장치는 실험유체 내에서 회전하며 점도값을 검출하는 스피들(spindle), 실험유체의 온도를 제어하기 위한 항온수조 TC-502 그리고 측정된 데이터를 모니터링하고 저장하기 위한 컴퓨터로 구성되어 있다. 점도측정은 열전도도 실험과 비교를 하기 위해 실험유체의 온도를 모두 열전도도의 실험온도와 동일하게 유지하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 열전도도

Fig. 3은 상온(25°C)에서 그래핀 M-5와

M-15를 각각 0.001 - 0.01 vol%의 비율로 첨가하여 제조한 그래핀 나노유체의 열전도도를

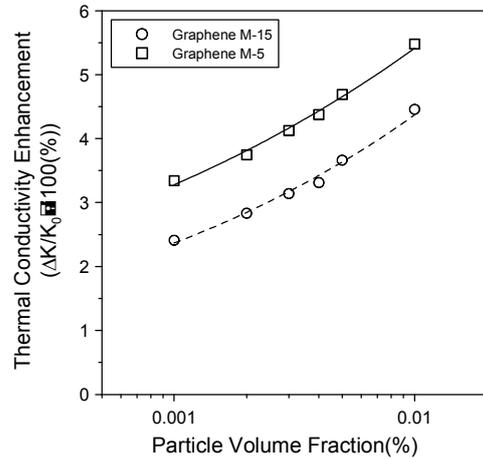


Fig. 3. Comparison of the thermal conductivity graphene M-5 and M-15.

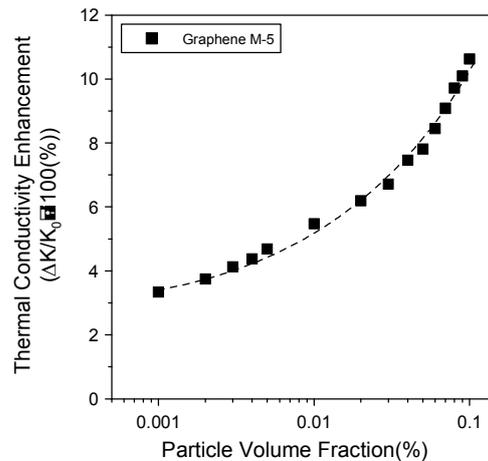


Fig 4. Measurement of thermal conductivity enhancement ratios as a function of particle volume fraction.

비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 평균 입자 직경이 작은 그래핀 M-5 나노유체의 열전도도 증가율이 그래핀 M-15 나노유체의 열전도도 증가율보다 높음을 알 수 있다. 특히, 0.01 vol%에서 그래핀 M-5 나노유체의 열전도도 증가율은 5.47%로 그래핀 M-15 나노유체의 열전도도 증가율

4.45%보다 약 1.2배 높음을 확인하였다. 이와 같은 결과는 그래핀의 직경이 그래핀 나노유체의 열전도도 증가율에 영향을 미치며, 직경이 작은 그래핀을 첨가한 그래핀 나노유체의 열전도도 효과가 더 좋다는 것을 의미한다. 그래핀과 같은 탄소동소체인 탄소나노튜브의 경우는 입자의 길이가 긴 것을 첨가한 나노유체가 열전도도가 높다고 보고되었다<sup>13)</sup>. 하지만 그래핀의 경우는 반대의 결과를 보였다. 이는 그래핀이 1차원 구조의 튜브형상을 가진 탄소나노튜브와는 다르게 2차원 구조의 판(layer) 형상을 가지고 있으며, 직경이 작은 그래핀을 첨가한 나노유체의 분산안정성이 우수하기 때문이라고 판단된다.

Fig. 4는 두 종류의 그래핀 나노유체에서 높은 열전도도 증가율을 나타낸 그래핀 M-5 나노유체의 열전도도를 0.1 vol%까지 추가적으로 측정하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 그래핀의 첨가비율이 증가함에 따라 열전도도 같이 증가함을 알 수 있다. 또한 0.1 vol%의 체적분율에서 그래핀 M-5 나노유체의 열전도도는 증류수 대비 10.63% 증가하였다. 이와 같이 작은 첨가비율에서 높은 열전도도 증가효과를 나타내는 그래핀 나노유체는 각종 열교환기의 효율을 증가시키는데 있어 상당히 우수한 효과를 나타낼 것이라고 판단된다.

### 3.2 점도

Fig. 5는 상온(25°C)에서 그래핀 M-5와 M-15 나노유체의 점도를 비교하여 나타낸 그래프이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 두 종류의 그래핀 나노유체 모두 첨가된 그래핀 입자의 양이 증가함에 따라 점도도 같이 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 그래핀 M-5를 첨가한 나노유체의 점도 증가율보다 그래핀 M-15 나노유체의 점도 증가율이 높다는 것을 알 수 있다. 0.01 vol%에서 그래핀 M-15 나노유체의 점도 증가율은 15.65%로 그래핀

M-5 나노유체의 점도 증가율 12.8%보다 약 1.2배 높음을 확인하였다. 이는 그래핀 M-15의 평균 입자 직경이 그래핀 M-5보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 이와 같은 실험결과를 평균 입자 직경이 큰 그래핀 보다

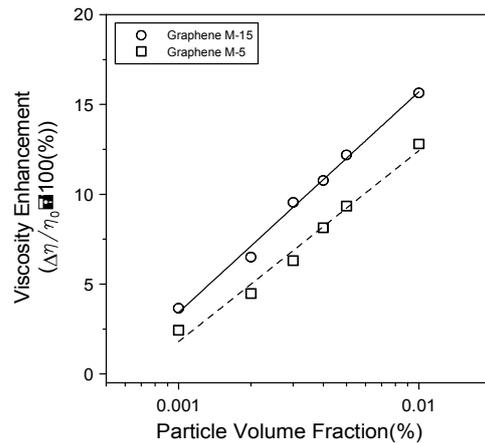


Fig. 5. Comparison of the viscosity graphene M-5 and M-15.

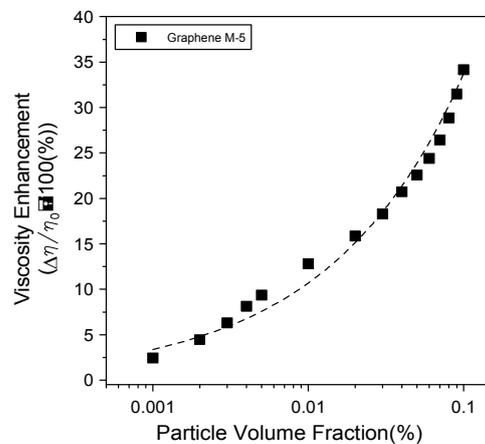


Fig 6. Measurement of viscosity enhancement ratios as a function of particle volume fraction.

작은 그래핀을 첨가하여 제조한 나노유체의 열전도도 및 점도 특성이 훨씬 우수하다는 것을 나타낸다.

Fig. 6은 그림 5에서 낮은 점도 증가율을 나타낸 그래핀 M-5 나노유체의 점도 증가율

을 0.1 vol%까지 추가적으로 측정하여 나타낸 그래프이다. 0.1 vol%의 체적분율에서 그래핀 M-5 나노유체의 증류수 대비 점도 증가율은 34.14%임을 확인하였으며, 그래핀 나노유체의 체적분율에 따른 점도 증가율은 열전도도 증가율보다 상당히 높음을 알 수 있다. 점도 증가율이 높다는 것은 열교환기 작동유체로서는 상당히 불리한 조건이다. 따라서 그래핀 나노유체의 점도를 저감시킬 수 있는 방법을 찾기 위한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 평균 입자 직경이 다른 두 종류의 그래핀을 각각 첨가하여 제조된 그래핀 나노유체의 열전도도 및 점도 특성을 상온(25°C)에서 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 그래핀 M-15를 첨가한 그래핀 나노유체보다 평균입자직경이 작은 그래핀 M-5를 첨가한 그래핀 나노유체의 열전도도 증가율이 높음을 알 수 있었다. 또한 0.01 vol%에서 그래핀 M-5 나노유체의 열전도도 증가율은 5.47%로 그래핀 M-15 나노유체의 열전도도 증가율 4.45%보다 약 1.2배 높음을 확인하였다.
- (2) 0.01 vol%에서 그래핀 M-15 나노유체의 점도 증가율은 15.65%로 평균입자직경이 작은 그래핀 M-5 나노유체의 점도 증가율 12.8%보다 약 1.2배 높음을 확인하였다.
- (3) 0.1 vol%에서 그래핀 M-5 나노유체의 열전도도는 증류수 대비 10.63% 증가하였고, 점도는 34.14% 증가하여 그래핀 나노유체의 체적분율에 따른 점도 증가율은 열전도도 증가율보다 상당히 높다는 것을 알 수 있었다.
- (4) 평균입자직경이 작은 그래핀을 이용하여 제조한 나노유체가 열전도도 및 점도 특성이 우수하다는 것을 알 수 있었다.

#### 후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(NO. 2012029406)

#### 참 고 문 헌

1. Das. S.K., Choi. S.U.S., Yu.W., Nanofluids Science and Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2008.
2. Novoselov. K.S. et al., Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films, Science 306, 666, 2004.
3. Novoselov. K.S. et al., Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene, Nature 438, 197, 2005.
4. Geim. A.K. and Kim. P., Carbon wonderland, Scientific American, 298, pp. 90-97, 2008
5. Yu. W., Xie. H., Wang. X., Wang. X., Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets, Physics Letters, 375, 1323-1328, 2011.
6. Gupta. S.S. et al., Thermal conductivity enhancement of nanofluids containing graphene nanosheets, Journal of Applied Physics, 110, 084302, 2011.
7. Hamilton. R.L., Crosser. O.K., Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, Ind. Eng. Chem. Fundamen., Vol. 1, p. 187, 1962.
8. Gao. L., Zhou. X.F., Differential effective medium theory for thermal conductivity in nanofluids, Physics Letters, Vol. 348, pp. 355-360, 2006.
9. Do. K.H. and Jang. S.P., Effect of nanofluids on the thermal performance of a flat micro heat pipe with a rectangular grooved wick, In. J. of Heat and Mass Transfer,

- Vol. 53, pp. 2183-2192, 2010.
10. Seo. H.M, Park S.S, Kim N.J., Characteristics of carbon nano fluid added PVP, Journal of Air-conditioning and Refrigeration, Vol. 22, NO. 5, pp 289-295, 2010.
  11. Bently, J.P., Temperature sensor characteristics and measurement system design, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1984, Vol. 17, pp. 430-435.
  12. Nagasaka, Y. and Nagashima, A., Absolute Measurement of the thermal conductivity of electrically conducting liquids by the transient hot-wire method, Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1981, Vol. 14, pp. 1435-1440.
  13. Park. S.S, Park. Y.C., Kim N.J., A comparative study on the characteristics of the MWCNTs and PVP added nanofluids, Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No.1, pp. 47-53. 2011.