

## 論文

Cu-TiB<sub>2</sub> 나노 금속복합재의 물성치에 대한 연구염영진<sup>\*,+</sup>, 김지순<sup>\*\*</sup>, 장명규<sup>\*</sup>Study on material properties of Cu-TiB<sub>2</sub> nanocompositeYoung-Jin Yum<sup>\*,+</sup>, Ji-Soon Kim<sup>\*\*</sup>, Myung-Gyu Chang<sup>\*</sup>

## ABSTRACT

Cu-TiB<sub>2</sub> metal matrix composites with various weight fractions of TiB<sub>2</sub> were fabricated by combination of manufacturing process, SHS (self-propagating high-temperature synthesis) and SPS (spark plasma sintering). The feasibility of Cu-TiB<sub>2</sub> composites for welding electrodes and sliding contact material was investigated through experiments on the tensile properties, hardness and wear resistance. To obtain desired properties of composites, composites are designed according to reinforcement's shape, size and volume fraction. Thus proper modeling is essential to predict the effective material properties. The elastic moduli of composites obtained by FEM and tensile test were compared with effective properties from the original Eshelby model, Eshelby model with Mori-Tanaka theory and rule-of-mixture. FEM result showed almost the same value as the experimental modulus and it was found that Eshelby model with Mori-Tanaka theory predicted effective modulus the best among the models.

## 초 록

고온자전합성법과 스파크 플라즈마 소결법으로 여러 가지 TiB<sub>2</sub> 함유량을 갖는 Cu-TiB<sub>2</sub> 금속복합재료를 제조하였다. 점용 접 전극과 미끄럼 접촉재로 사용하기 위해 인장특성, 경도, 마모저항 등의 물성치를 조사하였다. 강화재의 형상, 크기, 부피분율 등에 의해 복합재료의 특성이 달라지므로 유효물성치를 예측하기 위한 모델링이 필수적이다. 유한요소해석결과 유효탄성계수가 실험치와 일치하는 것을 확인하였고 Eshelby 모델, Mori-Tanaka의 평균장 이론이 결합된 Eshelby 모델, 혼합법칙 등으로 복합재료의 탄성계수를 예측한 결과 Mori-Tanaka의 평균장 이론이 결합된 Eshelby 모델이 실험치를 가장 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

**Key Words** : 금속복합재료(metal composite), 고온자전합성법(self-propagating high-temperature synthesis), 유효물성치(effective material property), Eshelby model, Mori-Tanaka 평균장 이론(mean field theory)

## 1. 서 론

금속기 복합재 (metal matrix composites)는 2종류 이상의 재료를 배합하여 각각의 장점을 살려 단독재료로는 획득할 수 없는 뛰어난 성질과 기능을 가진 제 3의 재료라 할 수 있다.

예를 들어 구리는 높은 전기적 열적 전도성, 제조의 용이성, 좋은 내부식성 때문에 산업현장에 널리 쓰이고 있는 재료이다. 반면에 구리는 낮은 경도와 낮은 항복강도를 가지고 있다. 이러한 점을 개선하기 위해서 구리에 산화물, 탄화물, 붕소화물 등의 분산입자를 첨가한다. 이들 분산입자는 높은 강도와

\* 울산대학교 기계자동차공학부

\*+ 울산대학교 기계자동차공학부, 교신저자(E-mail:yjyum@ulsan.ac.kr)

\*\* 울산대학교 첨단소재공학부

높은 용접을 지녀야하며 기지 금속내의 용해도가 낮아야 한다. 특히 TiB<sub>2</sub>는 고용점, 고경도와 낮은 저항을 및 우수한 열전도도를 지니고 있어 분산상으로서의 적용 가능성이 매우 크다고 할 수 있다.

최근 전자, 정보 통신 및 생명공학 산업의 급속한 발전으로 인해 나노기술에 대한 전 세계적인 관심에 발맞춰 TiB<sub>2</sub> 등의 분산 입자를 나노급의 입자로 만들어 금속기지에 첨가한 금속기 복합체의 기계적 성질과 내마모성에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 국내에서는 분무성형(spray forming)에 의해 제조한 TiB<sub>2</sub>가 분산된 구리합금을 제조하고 이의 미세구조와 기계적 성질에 대한 조사를 수행하였다[1]. 그러나 이 연구에서 TiB<sub>2</sub>의 크기는 나노 크기가 아닌 수 마이크로 크기였고, 나노 입자를 첨가하여 강화시킨 복합체를 제조하거나 이와 관련된 연구는 많이 볼 수 없다.

요구되는 복합체의 물성치를 얻기 위해서는 복합체의 구성 원소의 선택과 모재에 포함되는 강화재의 형상, 크기 및 체적비를 달리하여 복합체를 설계한다. 이를 위해 복합체의 등가 물성치를 예측하기 위한 모델링이 필수적이다. 지금까지 금속 복합재료의 기계적 성질을 예측하기 위하여 많은 연구가 진행되어왔다. 강화재로는 장섬유, 단섬유, 입자형태 등 여러 가지에 대하여 적용되었는데, 지금까지의 연구를 살펴보면 다음과 같다. 대표적으로 Hashin과 Shtrikman[2]은 변분법(variational approach)을 사용하여 복합체의 탄성계수, 열팽창계수 및 열전도계수 등 열기계적 등가 물성치의 상한값과 하한값을 예측하였다. Hill은 자기 일치 모델(self-consistent model)을 이용하여 복합체의 등가 물성치를 계산하였다. 각각의 강화재는 미지의 등가 물성치를 갖는 복합재속에 존재하는 것으로 가정하여, 반복계산법에 의해 등가 물성치를 계산하였다. Hill의 결과는 Voigt의 근사법으로 구한 등가물성치보다는 높고 Reuss의 근사법으로 구한 등가 물성치보다는 낮은 값을 나타내었다[3]. 비균질체의 상호작용을 고려하는 Mori-Tanaka의 평균장이론[4]이 결합된 Eshelby 이론[5]을 사용하여 Tandon과 Weng[6]은 복합체의 등가 물성치를 예측하였다. Eshelby 이론을 적용하여 형상기억합금[7]과 알루미늄 기지에 SiC를 첨가하여 강화한 복합체 해석[8]에 관한 연구도 있었다. 이 방법은 복합체 내에 존재하는 강화재의 불규칙적인 배치에 대해서도 적용이 가능한 것으로 알려져 있고, 또한 계산이 편리하여 여러 종류의 복합체의 등가 물성치를 예측하기 위해 사용되어왔다.

이번 연구에서는 나노 크기의 TiB<sub>2</sub>를 제조하여 이것을 구리에 첨가하여 금속기 복합체를 제조하고 점용접용 전극 및 미끄럼 접촉재료로의 가능성을 알아보기 위해 기계적 물성치 자료를 획득하고자 한다. 또 일정한 체적비의 강화재를 포함하는 금속 복합체의 탄성계수를 Original Eshelby 이론, Mori-Tanaka의 평균장 이론이 결합된 Eshelby 이론, 혼합물 법칙으로 예측하고, 동시에 이를 유한요소해석, 인장시험 결과와 비교하려고 한다.

## 2. 실험

### 2.1 Cu-TiB<sub>2</sub>의 제조

티타늄(순도 99.5%, 10 $\mu$  m), 비결정의 보론(순도 97%, 2-4 $\mu$  m) 그리고 구리분말(순도99.5%, 40 $\mu$  m)을 준비하고 Cu-TiB<sub>2</sub> 분말을 만들기 위해 티타늄, 구리, 보론 분말을 관형혼합기(tubular mixer)를 이용하여 30분 동안 섞는다. 혼합은 강구의 가속도가 600m/s<sup>2</sup> 인 볼분쇄기(ball mill) 안에서 이루어진다. 강구의 직경은 5mm 이고, 분말 대 강구의 비율은 1:20으로 한다. 기계적 처리 후 고온자전합성 반응기를 이용하여 Cu-TiB<sub>2</sub>분말을 만든다. 고온자전합성법을 통해 전류가 흐르는 아르곤 가스 안에서 텅스텐 와이어의 접점에 의해서 자발적으로 생성물로 변하게 된다. Cu-TiB<sub>2</sub>분말은 조직의 미세화를 위해 2차례의 밀링과정을 거친다. 이렇게 만들어진 분말들은 진공의 환경 하에서 방전 플라즈마 소결과정을 거친 후 실린더 형의 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합체로 만들어진다. 소결은 Sumitomo Coal Mining Company에서 제조한 방전 플라즈마 소결장치를 이용하였다. SPS공정 후 SEM를 통한 복합체의 미세조직은 Fig.1과 같다. 밝은 부분은 TiB<sub>2</sub>가 분산된 구리기지이고 어두운 부분은 SHS반응된 분말상이다.

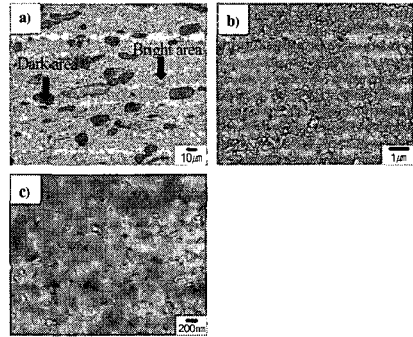


Fig. 1 SEM images of SPSed samples at 650°C, 30min. a) Cu-2.5wt% TiB<sub>2</sub> b) Cu c) TiB<sub>2</sub>.

### 2.2 인장시험

인장 시험의 목적은 Cu-TiB<sub>2</sub> 나노 금속복합체의 TiB<sub>2</sub> 함유량에 따른 인장 물성치를 구하는 것이다. 시편은 Small Specimen Test Technique[9]을 참조하여 Fig. 2와 같이 제작되었다. 시편은 순수구리와 2.5%, 5%, 7.5%의 중량비의 TiB<sub>2</sub>를 함유한 Cu-TiB<sub>2</sub>를 준비하였다.

시험 장치로는 Fig. 3에 나타나 있는 자체 제작한 인장 시험기를 사용하였고 하중과 변형률의 측정을 위해 Strain Smart scanner를 사용하였다. 시편형상의 제한과 정밀한 변형률 측정을 위해 strain gage를 사용하였다. 시험 상태는 0.25mm/min의 느린 속도로 하중을 가하면서 정확한 탄성계수와 항복강도를 구할 수 있도록 하였다. Strain Smart S/W를 이용하여 하중과 변형률 데이터를 획득하고 응력-변형률 선도를 그렸다.

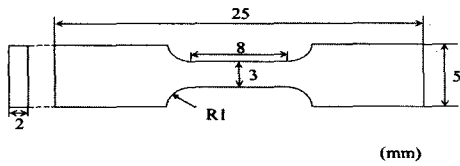


Fig. 2 Tensile test specimen.

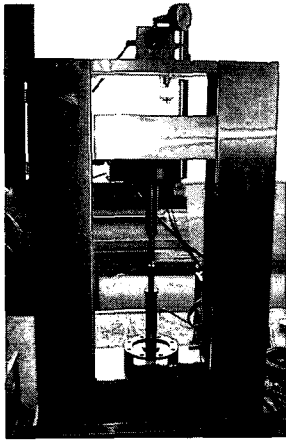


Fig. 3 Tensile test machine.

Table 1 Mechanical properties of Cu-TiB<sub>2</sub>

시 편	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
Cu	158	187	119
Cu-2.5wt.%TiB <sub>2</sub>	197	206	125
Cu-5.0wt.%TiB <sub>2</sub>	221	256	133
Cu-7.5wt.%TiB <sub>2</sub>	289	300	139

인장시험 후 획득한 기계적 물성치는 다음의 Table 1에 정리하였다.

위의 표에서 인장강도, 항복강도 탄성계수는 TiB<sub>2</sub> 함유량이 증가할수록 커짐을 알 수 있다. 예를 들어 기지금속이 구리이고 TiB<sub>2</sub> 함유량이 7.5 wt.% 일 때, 항복강도, 인장강도, 탄성계수는 TiB<sub>2</sub>가 강화되지 않을 때보다 각각 82.9%, 60.4%, 16.8% 증가하였다. 이러한 강도의 변화는 기지금속에서 TiB<sub>2</sub> 입자로의 효과적인 하중전달과 기지금속인 구리와 강화제인 TiB<sub>2</sub> 입자들 사이의 강한 계면 결합의 영향이라고 생각된다. 그러나 금속복합재가 가지는 취약점인 낮은 연성의 문제는 어떻게 개선시켜 나갈 것인지에 대한 연구가 해석과 실험을 통해 계속되어야 할 것이다.

### 2.3 경도시험

보강제인 TiB<sub>2</sub> 함유율에 따른 경도변화를 알아보기 위한

Table 2 Vickers microhardness of Cu-TiB<sub>2</sub>

시 편	Vickers microhardness (Hv)
Cu	101
Cu-2.5wt.%TiB <sub>2</sub>	136
Cu-5.0wt.%TiB <sub>2</sub>	159
Cu-7.5wt.%TiB <sub>2</sub>	197

경도 시험은 Matsuzawa사의 마이크로 비커스 경도계(MMT-7)를 사용하였다. 시험 전 시편은 Buehler사의 Grinder Polisher로 표면처리를 하였다. Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재에서 TiB<sub>2</sub> 입자가 고루 분포되지 않고 한 곳에 덩어리져 존재할 수 있기 때문에 경도 시험시 무작위로 10군데에서 측정된 비커스 경도치(H<sub>v</sub>)의 평균값을 경도 값으로 하였다. 적용하중 200gf, 적용하중속도는 50μm/sec로 하였고 압흔의 대각선 길이는 400배의 현미경에 의해 측정되었다.

Table 2는 기지금속인 구리와 TiB<sub>2</sub> 함유량에 따른 복합재의 경도 값을 나타낸 것이다. 경도시험 결과 TiB<sub>2</sub> 함유량이 많을수록 경도값이 현저히 커짐을 알 수 있었다.

### 2.3 마모시험

마모시험은 Fig. 4에 나타나 있는 Pin-On-Disk 시험 장치를 이용하여 핀 하중을 변화시키면서 각 조성별 Cu-TiB<sub>2</sub> 시편의 내마모성을 비교 확인하기 위하여 수행되었다. 판형 시편은 직경 5mm, 높이 10mm의 실린더 형태로 제작되었고, 디스크의 재질은 중탄소강이며, 직경 80mm, 두께 10mm로 준비되었다. 마모시험 전 디스크의 표면은 800 grit emery paper를 이용하여 표면처리하였고, 알코올로 세척하였다. 디스크의 조도는 대략 5μm(R<sub>a</sub>)이었다. 마모시험은 미끄럼속도가 0.83m/s, 적용하중은 29.4N, 44.1N으로 수행되었다. 판형 시편의 실제 마모량은 정밀저울을 이용하여 실험 전, 후 핀의 질량 변화를 측정하여 확인하였다.

Fig. 5는 적용하중이 29.4N 과 44.1N 일 때 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재의 TiB<sub>2</sub> 함유량에 따른 마모율을 나타낸 것이다. 마모율은 TiB<sub>2</sub>의 함유량이 커질수록 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 또한 적용하중이 증가 할수록 마모율은 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 경향으로 순수구리는 Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재보다는 높은 마모율을 나타내야 함에도 불구하고 마모시험 시 시편 부스러기가 떨어져 나오지 않고 오히려 시편주위에 눌러 붙어 질량감소량을 측정하지 못했다. 이 때문에 Fig. 5에는 순수구리의 마모율은 표시하지 못했다. Fig. 5에 나타나 있는 결과는 Tu[10]의 결과와 잘 일치하였다. 일부 논문[11, 12, 13]에서는 높은 적용하중 하에서 입자 강화제의 함유량이 증가할수록 미끄럼 마모저항이 감소함을 나타내었다. 이는 입자 강화제의 파손, 기지로부터의 이탈, 기지와 입자 강화제 사이의 불안정한 계면결합 때문인 것으로 나타내었다. 만약 기지와 강화제 사이의 계면결합이 약할 경우 강화제가 쉽게 기지로부터 이탈하고 마모율이 증대될 것이다. 이번 연구에서는 TiB<sub>2</sub> 함유량이 증가할수록 마모저항이 증대됨을 확인 할 수 있었다.

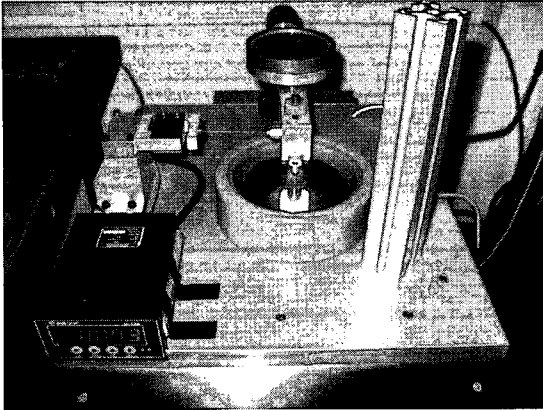


Fig. 4 Wear test machine.

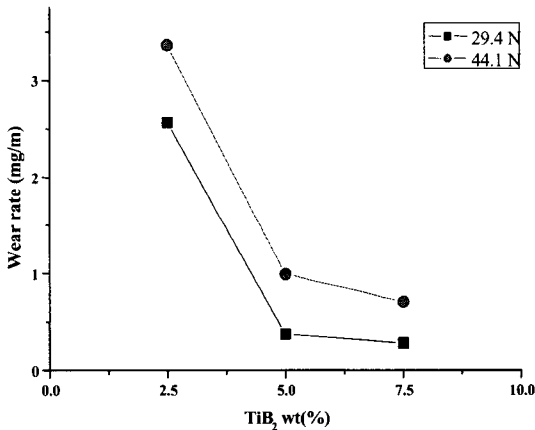


Fig. 5 Wear rate of Cu-TiB<sub>2</sub>.

### 3. 등가물성치 예측 모델링 및 수치해석

#### 3.1 등가물성치 예측 및 모델링

Eshelby 이론의 기본적인 모델은 Fig. 6과 같다. 먼저 강화재의 형상을 타원형상으로 가정한다. 만약 기지재 영역에서 일부분을 타원형상으로 잘라내면 잘려져 나온 부분에서는 응력이 거의 걸리지 않게 되고 타원형상을 유지한 채로  $e_{ij}^*$  만큼의 크기로 변화한다.

이때의 변형률을 고유 변형률로 정의한다. 잘려진 부분의 변형률을 0인 상태로 만들어 원래의 상태로 만들면 계면을 따라 변형은 발생하지 않으면서 장력이 제거된다. 이렇게 하여 평형상태에 도달했을 때의 변형률을 구속변형률  $e_{ij}$ 로 정의한다. 고유변형률과 구속변형률은 Fig. 6에 명시한 것과 같이  $e_{kl} = S_{klmn} e_{mn}^*$ 와 같은 관계를 가진다.

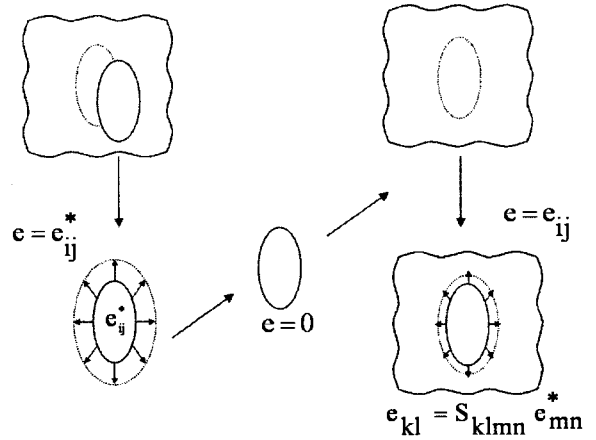


Fig. 6 Modeling of the inclusion and the matrix.

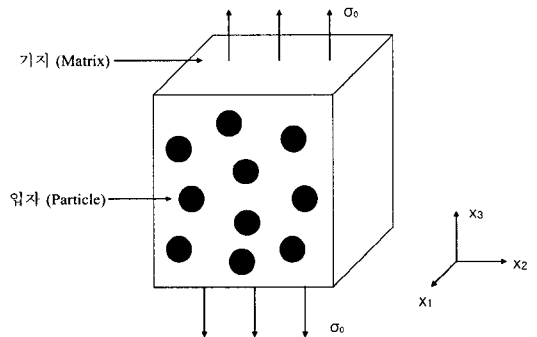


Fig. 7 Composite model under the applied stress  $\sigma_0$  along  $x_3$ -axis.

#### 3.1.1 Original Eshelby's Model

3차원 무한체 내에 강화재가 배열되어 있다고 가정한다. 이 무한체에  $x_3$  방향으로  $\sigma_0$  를 가한다.(Fig. 7)

Eshelby의 등가 개재물법이 적용된 무한체내의 응력( $\sigma$ )은 외부조건( $\sigma_0$ )을 고려하면 다음 식으로 표시된다.

$$\sigma_0 + \sigma = C_I \cdot (e_0 + e) \tag{1}$$

$$= C_m \cdot (e_0 + e - e^*) \tag{2}$$

여기서 아래첨자  $m$  및  $f$ 는 모재와 강화재를 나타낸다. 그리고  $C$ 는 강성텐서,  $e_0$ 는 강화재가 없을 경우 인가하중  $\sigma_0$ 에 의해 발생하는 모재의 균일 변형률장으로  $\sigma_0 = C_m \cdot e_0$ 의 관계를 갖는다.  $e$ 는 강화재 내의 교란 변형률,  $e^*$ 는 Eshelby의 등가 개재물법에 의해 발생하는 등가 고유변형률(eigenstrain)로 계산될 값이다. Eshelby tensor  $S$ 는 강화재의 형상과 모재의

프와송 비( $\nu$ )에 의해 결정되는 것으로,  $\underline{e}$ ,  $\underline{e}^*$  그리고 Eshelby tensor  $\underline{S}$  사이에는 다음과 같은 관계가 존재한다. 기지와 개재물의 강성텐서  $\underline{C}$ , Eshelby 텐서  $\underline{S}$ , 외부 인가하중  $\underline{\sigma}_0$ 은 모두 주어진 값이다.

식 (2)로부터

$$\underline{e} = \underline{S} \cdot \underline{e}^* \quad (3)$$

$$\underline{e}_0 = \underline{C}_m^{-1} \cdot \underline{\sigma}_0 \quad (4)$$

식 (1)-(4)로부터

$$\underline{e}^* = [(\underline{C}_f - \underline{C}_m) \cdot \underline{S} + \underline{C}_m]^{-1} \cdot (\underline{C}_m - \underline{C}_f) \cdot \underline{C}_m^{-1} \cdot \underline{\sigma}_0 \quad (5)$$

복합재에  $x_3$  방향으로 하중이 작용하므로

$$\underline{\sigma}_0 = \underline{\sigma}_0 [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0] = \underline{\sigma}_0 \underline{P} \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다.

식 (6)을 이용하여 고유변형률(eigenstrain)  $\underline{e}^*$ 을 다시 쓰면,

$$\underline{e}^* = \underline{\sigma}_0 [(\underline{C}_f - \underline{C}_m) \cdot \underline{S} + \underline{C}_m]^{-1} \cdot (\underline{C}_m - \underline{C}_f) \cdot \underline{C}_m^{-1} \cdot \underline{P} \quad (7)$$

이 된다.

Eshelby는 복합재의 변형 에너지(strain energy)를 다음과 같이 보였다.

$$U = \frac{1}{2} \int_V (\underline{\sigma} + \underline{\sigma}_0) \cdot (\underline{e} + \underline{e}_0) dV \quad (8)$$

변형에너지를 이용하여 변형에너지 밀도(strain energy density)를 구해보면

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{2} \underline{\sigma}_0 \cdot \underline{e}_0 + \frac{f}{2} \underline{\sigma}_0 \cdot \underline{e}^* \\ &= \frac{1}{2} \underline{\sigma}_0 \cdot (\underline{C}_m)^{-1} \cdot \underline{\sigma}_0 + \frac{f}{2} \underline{\sigma}_0 \cdot \underline{e}^* \end{aligned} \quad (9)$$

이다. 여기서  $f$ 는 입자의 체적비를 뜻한다.

복합재의 변형에너지 밀도(strain energy density)를 구해보면

$$u_m = \underline{\sigma}_0 \cdot (\underline{C}_m)^{-1} \cdot \underline{\sigma}_0 \quad (10)$$

식 (9)와 식 (10)을 비교하면 복합재의 강성텐서  $\underline{C}$ 를 구할 수 있다.

### 3.1.2 Eshelby's model with Mori-Tanaka's theory

Mori-Tanaka의 이론을 이용한 Eshelby 모델은 개재물간의 상호작용으로 생기는 기지영역의 강화재에 의한 평균 교란 변형률  $\bar{\underline{e}}$ 을 고려하여야 한다.

Eshelby의 등가개재물법이 적용된 Fig. 7로부터 무한체내의 응력( $\underline{\sigma}$ )은 외부조건( $\underline{\sigma}_0$ )을 고려하면 다음 식으로 표시된다.

$$\underline{\sigma}_0 + \underline{\sigma} = \underline{C}_f \cdot (\underline{e}_0 + \underline{e} + \bar{\underline{e}}) \quad (11)$$

$$= \underline{C}_m \cdot (\underline{e}_0 + \underline{e} + \bar{\underline{e}} - \underline{e}^*) \quad (12)$$

외부 하중의 경계조건은  $\underline{\sigma}_0$ 이므로, 교란응력을 복합재 전 영역에 걸쳐 체적적분을 하면 0이 되어야 한다.

$$\text{즉 } \int \underline{\sigma} dV = 0 \text{ 으로부터}$$

$$\bar{\underline{e}} + f(\underline{e} - \underline{e}^*) = 0 \quad (13)$$

식 (11), 식 (12) 그리고 식 (13)으로부터

$$\underline{e}^* = (1-f) \cdot (\underline{C}_f - \underline{C}_m) \cdot (\underline{S} - \underline{I}) + \underline{C}_f \cdot \underline{C}_m^{-1} \cdot (\underline{C}_m - \underline{C}_f) \cdot \underline{e}_0 \quad (14)$$

가 된다.

식 (6)을 이용하여 고유변형률(eigenstrain)  $\underline{e}^*$ 는

$$\underline{e}^* = \underline{\sigma}_0 [(1-f) \cdot (\underline{C}_f - \underline{C}_m) \cdot (\underline{S} - \underline{I}) + \underline{C}_f]^{-1} \cdot (\underline{C}_m - \underline{C}_f) \cdot \underline{C}_m^{-1} \cdot \underline{P} \quad (15)$$

이 된다. 앞의 변형에너지 밀도 식 (9)와 (10)을 이용하여 복합재의 강성텐서  $\underline{C}$ 를 구할 수 있다.

## 3.2 유한요소해석

연속상태의 입자상태의 강화재를 사용한 복합재료에 대하여 2차원적인 해석을 수행하였다. 복합재료의 2차원 단면형상의 단위요소(unit cell)에 대하여, 횡방향, 종방향의 간격이 동일한 4분의 1원형 입자상태의 강화재와 나머지 부분은 금속기지 재료에 대한 유한요소분할을 하였다. 본 연구에서의 부피 분율은 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 vol%를 선택하여 각 분율에 따른 복합재의 탄성계수를 계산하였다. 입자 강화재의 부피 분율의 변화에 따라, 강화재의 크기를 증가시켰다. 실제 해석은 상용 유한요소 프로그램인 MARC[14]를 사용하였으며, 부피 분율에 따라 4절점의 평면요소를 사용하였다. 본 논문의 유한요소 해석 모델링은

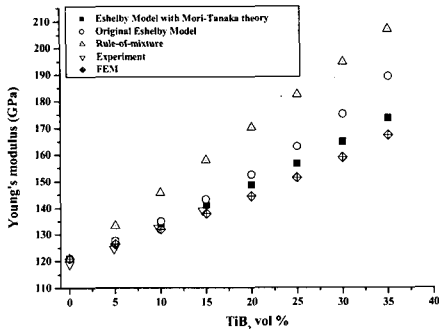


Fig. 8 Effective moduli for volume fraction of TiB<sub>2</sub>.

대칭성을 고려하여 1/4만 모델링 하였고, 가로, 세로의 한 변의 길이는 1로 하였다. 강화재의 체적 비에 따라 모델링이 달라지므로 이차원 해석 시 요소 수는 340~440개, 절점 수는 373~478개이었다. 해석 시 경계조건은 대표체적 요소의 외곽을 따라서 부여하였다. 대표체적요소의 아랫면에 있는 절점들에 대하여 y 방향 변위를 고정하였고, 왼쪽 면에 있는 절점들에 대하여서는 x 방향의 변위를 고정하였다. 하중조건은 위쪽 면에 단위응력인 1kg/mm<sup>2</sup> 을 부여하였다.

### 3.3 등가물성치 비교

Fig. 8은 구형 입자의 복합재의 Original Eshelby 이론, Mori-Tanaka의 평균장 이론이 결합된 Eshelby 이론, 혼합물 법칙으로 예측한 탄성계수와 유한요소해석, 인장시험을 통해 얻어진 탄성계수를 TiB<sub>2</sub>의 함유량에 따라 비교한 것이다. 시험 제작의 제한성 때문에 시험결과는 TiB<sub>2</sub> 20 vol% 안에서만 비교가 가능하였다.

모든 방법에서 TiB<sub>2</sub> 량이 증가함에 따라 탄성계수가 현저히 증가하는 현상을 확인하였다. 가장 단순한 모델인 혼합법칙에 의한 결과는 탄성계수를 지나치게 과대평가 하는 것으로 나타났다. FEM 결과는 실험치와 잘 일치하였고, 모델 중에서는 Mori-Tanaka의 평균장 이론이 결합된 Eshelby 모델이 실험치를 가장 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

기계적 합금화(Mechanical alloying : MA)와 고온자전합성법(Self-propagating high-temperature synthesis method : SHS)의 조합으로 나노 복합재 Cu-TiB<sub>2</sub>를 제조하고 점용점용 전극 재료 및 미끄럼 접촉재료로의 가능성을 알아보기 위해 인장시험, 경도시험, 마모시험을 통해 기계적 물성치를 측정하였다. 요구되는 복합재의 물성치를 얻기 위해서는 복합재의 등가 물성치를 예측하기 위한 모델링이 필수적이다. 이를 위해 일정

한 체적비의 강화재를 포함하는 금속 복합재의 탄성계수를 Original Eshelby 이론, Mori-Tanaka의 평균장 이론이 결합된 Eshelby 이론, 혼합물 법칙 모델로 각각 예측하고, 동시에 이를 유한요소해석, 인장 시험결과와 비교하였다.

이를 바탕으로 수행한 연구결과 내용을 정리하면 다음과 같다.

- (1) Cu-TiB<sub>2</sub> 복합재의 인장시험 결과 TiB<sub>2</sub>의 함유량이 증가할수록, 복합재의 인장강도, 항복강도, 탄성계수는 증가하였다. 경도시험 역시 TiB<sub>2</sub>의 함유량이 증가할수록 경도 값이 커짐을 알 수 있었다. 마모시험의 결과 순수구리 시편을 제외하고 TiB<sub>2</sub> 함유량이 증가하면 마모저항이 커짐을 확인하였다. 이 결과는 여타의 다른 논문에서의 결과와 같은 경향을 보였다.
- (2) 계면결합이 강하고 입자가 구형상인 복합재라 가정할 경우, 2차원적인 유한요소모델링을 통하여 TiB<sub>2</sub>의 체적비의 변화에 따라 계산된 횡방향 탄성계수와 인장시험을 통해 얻은 탄성계수는 TiB<sub>2</sub>의 체적비 20%이내에서는 Original Eshelby 이론, Mori-Tanaka의 평균장 이론이 결합된 Eshelby 이론으로 예측한 값과 유사한 값으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부에서 시행하는 지역산업기술혁신사업으로 울산대학교 기계부품 및 소재특성평가연구센터의 지원에 의한 것입니다.

## 참고문헌

- 1) 이종상 외 "Spray Forming으로 제조된 Cu-TiB<sub>2</sub> 합금의 미세조직과 상온 항복강도에 관한 연구," 대한금속학회지, Vol. 36, No. 7, 1998, pp. 588-596.
- 2) Hashin Z. and Shtrikman, "A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.11, 1963, pp. 127-140.
- 3) Aboudi J. "A Unified Micromechanical Approach - Mechanics of Composite Materials," pp. 14-18.
- 4) Mori T. and Tanaka K, "A verage Stress in the matrix and Average Elastic Energy of Materials with Misfitting Inclusions," *Acta Metallurgica*, Vol. 21, 1973, pp. 571-574.
- 5) Eshelby J.D., "The determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems," *Proc. of the Royal Society of London*, Vol. A241, 1957, pp. 376-396.
- 6) Tandon G.P. and Weng G.J., "Average Stress in the

- Matrix and Effective Moduli of Randomly Oriented Composites," *Composites Science and Technology*, Vol.27, 1986, pp. 111-132.
- 7) 이재곤, 염영진, 최성배, "기공을 갖는 형상기억합금의 응력 및 변형률 관계에 대한 이론적 고찰," 한국복합재료학회지, Vol. 17, No. 6, 2004, pp. 8-13.
  - 8) 이재곤, 김진곤, "강화재의 크기 및 배치에 따른 복합재의 등가 물성치 예측에 대한 연구," 한국복합재료학회지, Vol. 18, No. 5, 2005, pp. 21-26.
  - 9) Farrell K. et al., "Small Specimen Procedures for Determination of Deformation Maps," *ASTMSTP 1418*, 2002, pp. 283-293.
  - 10) Tu J.P., Rong W., Guo S.Y. and Yang Y.Z., "Dry sliding wear behavior of in situ Cu-TiB<sub>2</sub> nanocomposites against medium carbon steel," *Wear*, Vol. 255, 2003, pp. 832-835.
  - 11) Tu J.P., Meng L. and Liu M.S., "Friction and wear of Cu-Fe<sub>3</sub>Al powder metallurgical composites in dry sliding," *Wear*, Vol. 220, 1998, pp. 72-79.
  - 12) Saka N. and Karalekas D.P., "Friction and wear of particle-reinforced metal ceramic composites," *Proceedings of the International Conference on Wear of Materials*, Canada, 1985, pp. 784-793.
  - 13) Alpas A.T. and Embury J.D., "Sliding and abrasive wear behavior of an aluminum(2014)-SiC particle reinforced composites," *Script Metall. Mater.*, Vol. 24, 1990, pp. 931-935.
  - 14) MARC MENTAT, User's manual, MSC, 1997.