# 다방향으로 입체 보강된 복합재의 열전도계수 예측

이상의[*] · 유재석[*] · 김천곤[**] · 홍창선[**] · 김광수[***]

# Prediction of Thermal Conductivity of Spatially Reinforced Composites

Sang-Eui Lee[*], Jae-Suk Yoo[*], Chun-Gon Kim[**], Chang-Sun Hong[**], and Kwang-Su Kim[***]

**Key Words** : Spatially Reinforced Composites, Thermal Conductivity, Volume Averging, Thermal Resistance

**ABSTRACT**

This paper predicted the thermal conductivity of spatially reinforced composites(SRC) by applying the volume averaging method and the thermal resistance method. The former method employs existing micro-mechanical theories and conventional transformation rules to constitute relations for the unit cells of the composites and the latter one uses the analogy between the diffusion of heat and electrical charge. To verify the theoretical prediction, the thermal conductivity of 4-D(dimensional) SRC was examined experimentally. The comparison of the numerical results with those measured by the experiment showed good agreement.

## 1. 서 론

공간적으로 보강된 복합재료는 입체적으로 보강이 이루어진 복합재료로서, 섬유 다발로 이루어진 보강 라드(rod)의 특정방향으로의 체적비(volume fraction)와 방향에 따라 물성이 변하므로 이들을 조절하여 원하는 물성을 가지는 복합재 구조물을 설계할 수 있다. 그리고 2 차원적으로 보강이 이루어진 복합재 적층판(laminate)과는 달리 두께방향으로 보강이 이루어져 파손의 주원인으로 나타나는 층간분리현상을 방지할 뿐만 아니라, 이 방향으로의 충격 강도나 열전도 특성도 우수하다. 또한 이 SRC 가 재진입 로켓의 노즈 팁(nose tip)이나 노즐에 적용되고 있는 실정이므로, 이런 구조물에 사용되기 위해서는 먼저 설계요구조건에 부합하는 물성치를 가지는 SRC 구조의 설계가 요구되어진다.

본 연구는 이 SRC 의 열적 물성치 중 열전도계수의 예측과 실험에 초점을 맞추어 수행되었다. Ning[1]과 Dasgupta[2]는 열저항(thermal resistance) 개념과 규질화 개념(homogenization scheme)을 이용하여 woven-fabric 복합재의 열전도계수를 예측하였다. 보강 섬유와 모재 간의 기하학적 형태를 정확하게 알아야 하며, 수식이 복잡하여 사용하기에 까다로운 단점이 있으나, 실험 결과와 비교하여 예측이 잘 이루어짐을 보였다. Teters[3]는 한 평면 내에서 곡선적(curvilinear)으로 보강이 되고 그 평면에 수직한 방향으로는 직선형으로 보강된 복합재에 대해 체적평균개념을 이용하여 열전도계수를 예측하였으며, 직선형으로 보강된 방향으로의 예측은 비교적 정확하나, 곡선형으로 보강이 이루어진 섬유들에 대해 수직한 방향으로는 잘 맞지 않음을 보였다. Tai[4]는 3-D SRC 의 열전도계수에 대해 열저항개념을 이용한 예측식을 제안하였으나,

* 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공 대학원
** 한국과학기술원 기계공학과 항공우주공학전공
*** 한국항공우주산업주식회사

실험과의 비교·검증은 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 SRC 중 3-D 및 4-D SRC 에 대해 체적평균개념과 열저항개념을 다 적용하여 열전도계수를 예측하였으며, 두 예측 결과를 비교하였다. 그리고 열전도계수를 3 차원적으로 나타내어 구조의 변화에 따른 특성을 살펴보았으며, 예측 모델의 타당성을 검증하기 위하여 4-D SRC 에 대해 예측결과와 실험결과를 비교하였다.

본 연구에서는 공간적으로 보강된 복합재의 열전도계수를 구하기 위해 라드와 모재 사이의 열접촉저항(thermal resistance)은 무시하였으며, 특정방향으로의 열전도계수를 구할 때 열유동(heat flux)는 주어진 방향으로 평행하게 흐른다고 가정하였다.

## 2. 체적평균 이용한 열전도계수 예측

체적 평균법은 공간적으로 보강된 복합재의 모든 특성을 포함하면서 가장 작은 크기의 단위구조(unit cell) 개념을 이용하여 실제 구조물이 이 단위구조가 계속적으로 반복되면서 이루어진다고 생각한다. 이런 단위구조를 이용한 해석기법은 복잡한 해석 모델을 피하면서도 구성성분의 공간적 분포를 고려하며 비교적 정확하다는 장점이 있다.

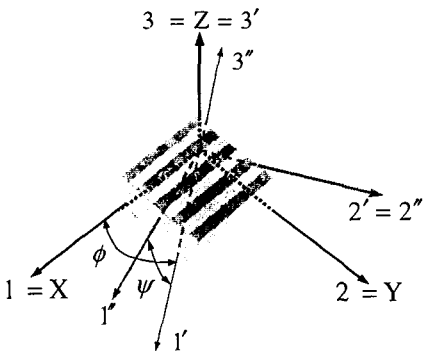


**Fig. 1 Local and global coordinate system of unit cell.**

체적평균의 정의는 이 단위 구조의 물성치가 $n$ 개의 일방향(unidirectional) 복합재 블록으로 되어 있다고 가정하므로, 국부좌표계에서 일방향 복합재의 열물성치를 먼저 예측하여 이것을 전체좌표계로 변환하고, 이 변환된 물성치에 각 방향에 대한 체적비로 가중치를 준 후, 이들을 더하여 단위구조의 열물성치를 얻게된다. 따라서 n 방향으로 보강된 복합재의 열전도계수는 다음과 같이 얻어진다.

$$[K]=\sum_{i=1}^{n}\frac{V_{r_i}}{V_r}[T]_i^T[k'']_i[T]_i \qquad (1)$$

여기서 $V_r=\sum_{i=1}^{n}V_{r_i}$ 이고, $[k'']$ 은 국부좌표계에서의 일방향 복합재의 열전도계수이며, $[T]$ 는 국부좌표계에서 전체 좌표계로의 변환행렬로서, 각 좌표계에서의 열유동(heat flux)과 온도구배(thermal gradient)의 좌표변환관계로부터 얻어진다.

## 3. 열저항 개념 이용한 열전도계수 예측

### 3.1 열저항의 기본 개념

1 차원 정상 상태(steady state)에서의 열전도는 다음의 관계식을 따르며,

$$q = -kA\frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L}(T_1-T_2) \qquad (2)$$

저항을 전달률(transfier rate)과 기동 전위(driving potential)의 비로 정의함으로써 열저항을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R = \frac{T_1-T_2}{q} = \frac{L}{kA} \qquad (3)$$

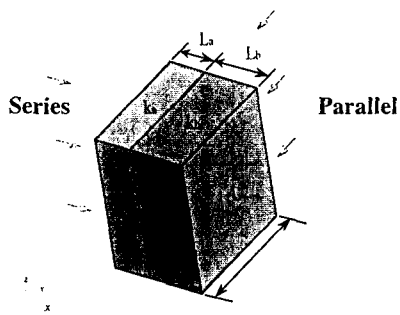


**Fig. 2 The concept of the thermal resistance.**

이 열저항은 전기저항과 같이 직렬(series)저항과 병렬(parallel) 저항으로 나눌 수 있다. Fig. 2 에서 보듯이 직렬의 경우는 열유동의 방향과 복합재료의 접합면의 방향이 평행하고, 병렬의 경우는 열유동의 방향과 재료의 접합면의 방향이 수직하며, 다음과 같은 관계로 유도되어진다.

$$R_{series} = R_a + R_b \tag{4a}$$

$$\frac{1}{k_{series}} = \frac{V_a}{k_a} + \frac{V_b}{k_b} \tag{4b}$$

$$\frac{1}{R_{parallel}} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_b} \tag{5a}$$

$$k_{parallel} = k_a V_a + k_b V_b \tag{5b}$$

여기서, $V$ 는 각 접합 재료의 체적비이다.

### 3.2 3-D SRC 에 대한 열저항 개념의 적용

3-D SRC 에 대해서는 Tai[4]가 제안한 식을 적용하되 일방향 복합재료의 열전도계수를 얻기 위해 사용되는 Springer[5]의 식을 Hashin[6]이 제안한 식으로 대체하여 사용하였다.

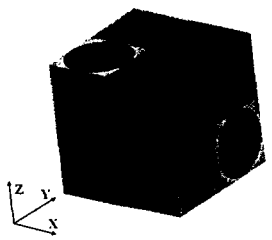


**Fig. 3 A concept of the application of thermal resistance to 3-D SRC.**

### 3.3 4-D SRC 에 대한 열저항 개념의 적용

4-D SRC 에 대해서는 일반적으로 단위구조를 가장 작은 단위의 정삼각형이나 정육각형으로 취하나 본 연구에서는 단위구조를 다르게 취하였다. 일반적인 식의 유도를 위해 일단 각 보강 방향 라드의 열전도계수는 서로 다르다고 가정하여 식을 유도하였다. Fig. 4 에서 보듯이 전체 좌표계의 X 축과 $x_1$ 축의 방향은 일치되어 있어서, $x_1$ 축 방향은 0°방향, $x_2$, $x_3$ 축 방향은 60°, 120°방향으로 향하고 있다고 가정한다. 이 연구에서는 한 평면 내에서 0°, 60°, 120°방향과 이 평면에 수직한 방향(Z 방향)으로 보강이 된 4-D SRC 를 고려하였으며, 열저항 개념을 적용하기 위해 4-D SRC 가 0°, 60°, 120°방향의 세 개의 층으로 구성되어진다고 가정하였다. 그리고 Fig. 5 에 나타낸 것처럼 각 층의 국부좌표계에 대해 단위구조를 정삼각형이나 정육각형 형상이 아닌 사각형 형상으로 취하여, 이 단위구조에 대해 열저항 개념을 이용하여 열전도계수를 구한 후, 이 값을 그 층 전체의 열전도계수로 가정하였다. 그리고 나서 각 층의 열전도계수를 좌표계의 변환 관계를 이용하여 전체 좌표계에 대해 얻은 후, 다시 한번 열저항 개념을 이용하여 4-D SRC 의 유효 열전도계수를 얻었다. 국부좌표계에서 전체좌표계로의 각 층의 열전도계수의 변환관계는 체적 평균법에서와 같다.

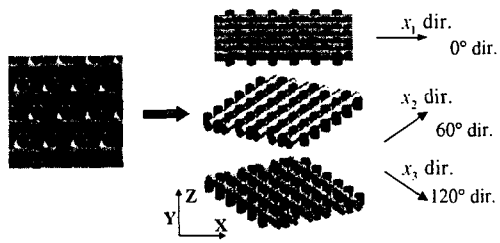


**Fig. 4 A concept of the application of thermal resistance to 4-D SRC.**

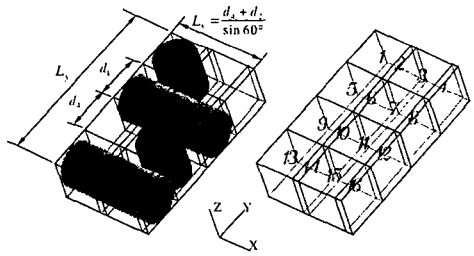


**Fig. 5 A unit cell of a lamina of 4-D SRC.**

### 3.4 SRC 열전도계수의 3 차원적 분포

위에서 설명한 개념을 사용하여 공간적으로 보강된 복합재의 열전도계수에 대한 3 차원적 특성을 살펴볼 수 있다. 예측 프로그램의 입력값은 Table 1 에 나타내었다.

Fig. 6 와 7 은 Table 1 의 물성치를 사용하여 각각 모든 방향으로 동일한 물성치와 크기를 가지는 라드로 보강된 3-D SRC 와 4-D SRC 에 대해 열물성치의 분포이다. 그림으로부터 모든 방향으로 동일한 보강이 이루어질 경우 3-D SRC 는 등방성을 보이며, 4-D SRC 는 횡방향 등방성(transversely

isotropy)를 보임을 알 수 있다.

**Table 1 A unit cell of a lamina of 4-D SRC**

| Constituent | Unit | fiber | matrix | rod |
|---|---|---|---|---|
| Material | | T300 | carbon | T300/carbon |
| $k_1$ | W/mK | 8.3648 | 25 | 14.02 |
| $k_2$ | W/mK | 0.8365 | 25 | 5.92 |

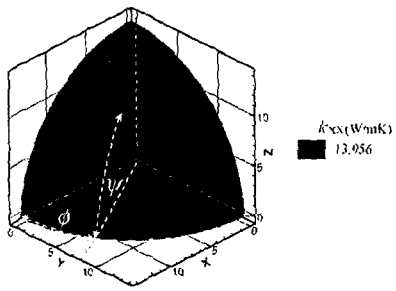


**Fig. 6 A distribution of the thermal conductivity of 3-D SRC.**

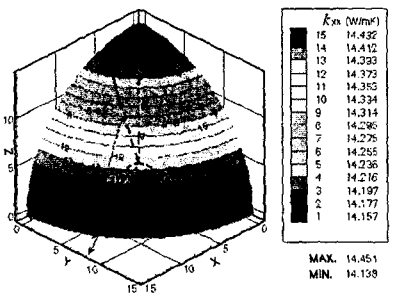


**Fig. 7 A distribution of the thermal conductivity of 4-D SRC.**

## 4. SRC 의 열전도계수 실험

본 연구에서는 예측 결과를 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 보강 라드는 미국 CST(composite structures technology)의 제품을, 그리고 에폭시는 국도화학의 제품을 사용하여 SRC 를 제작하였다. SRC 의 열전도계수를 예측하기 위해 $k_{r,1}$, $k_{r,2}$, $k_m$ 이 필요하며, $k_{r,1}$는 CST 사에서 받은 데이터를 사용하였으며, $k_{r,2}$ 와 $k_m$ 은 실험을 통하여 구하였다.

### 4.1 라드의 횡방향 열전도계수의 측정

CST 사에서 구입한 직경이 0.67mm 와 1.33mm 인 라드는 직경과 장비의 분해능을 고려해볼 때 라드 자체를 가지고 실험을 할 경우, 실험이 어려울 뿐만 아니라 실험에서 얻은 결과도 큰 오차를 포함할 가능성이 매우 크다. 따라서 본 연구에서는 라드로 일방향 복합재 시편을 제작한 후, 이것의 열전도계수($\bar{k}_{1D,2}$)와 수지의 열전도계수 그리고 라드와 기지의 체적비를 안 상태에서 라드의 횡방향 열전도계수를 역추적하는 방법을 사용하였다. 역추적에 사용된 식은 다음과 같다.

$$k_{r,2} = k_m \frac{k_m V_m - \bar{k}_{1D,2}(1+V_r)}{\bar{k}_{1D,2} V_m - k_m (1+V_r)} \tag{6}$$

시편은 50x40x10(mm)의 크기로 제작되었으며, 제작된 시편의 프리폼의 단면 형상은 Fig. 8 과 같다. 일방향 복합재에 있어서 섬유나 라드가 정육각형 형상의 배열을 가질 경우 단면 내에서 횡방향 등방성을 가진다고 알려져 있으며, Lee[7]는 사각형 배열보다는 정육각형 배열이 사각형 배열보다는 예측식의 결과나 실험결과와 더 잘 일치함을 보이고 있어, Fig. 8 에 보이는 것처럼 정육각형 배열을 이루도록 라드를 적층하였다. 각 라드 사이의 간격은 일정한 두께의 종이와 접착필름을 사용하여 유지되게 하였다

**Fig. 8 A cross section of a preform of unidirectional composite.**

Fig. 8 와 같이 프리폼을 제작한 후, 국도화학의 수지(YD114)와 경화제(H4198)를 부피비 40:69 로 섞은 에폭시에 함침시켜 일방향 복합재를 제작하였다. 기포를 제거하기 위해 BYK 사의 탈포제 BYK 515 를 부피에 대해 0.5%를 에폭시에 첨가하는 동시에 진공을 잡아주었다. 보통의 복합재료의 성형 과정과는 달리 에폭시가 액상으로 되어 있어 진공과 압력을 동시에 가할 수가 없었다. 그래서 Fig. 10 에 보여지는 지그 내부에 일방향 복합재 프리폼을 넣어 에폭시에 함침시킨 후, 30 분동안 진공을 잡아준 다음, 이 진공 지그를 제거한 후에 Autoclave 에 넣어, Fig.9 와 같은 성형사이클을 따라 성형하였다. Fig. 10 의 오른쪽에 보이는 진공펌

프와 지그 사이의 연결부를 지그 뚜껑의 홈부분에 올린 후 모든 결합부를 실링테입(sealant)으로 막아 진공을 잡아주었다. 진공을 30 분만 잡아준 것은 사용한 에폭시가 수지와 경화제를 섞은 후 25 분 정도부터 공기와 맞닿은 에폭시 부분에서 경화가 일어나면서 막을 형성하였기 때문에 그 이후로 진공을 잡아주는 것은 의미가 없다고 보았기 때문이다.

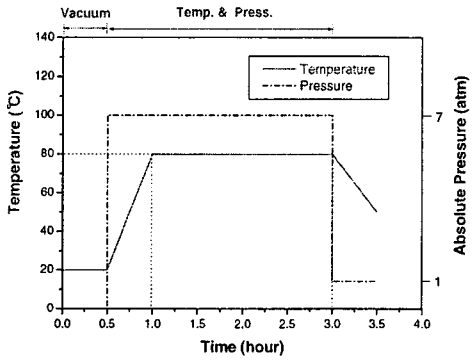


**Fig. 9 Curing cycle for unidirectonal and spatially reinforced composite.**

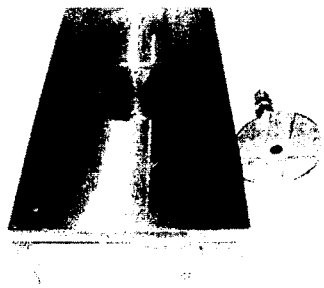

**Fig. 10 Vacuum jig of unidirectional and spatially reinforced composite.**

실험은 천이열선법(transient hot-wire method)을 이용하여 수행되었으며, 온도는 22℃, 습도는 55% RH(relative humidity)를 유지하였다. 이 방법은 50x40x10(mm) 크기의 두 개의 시편 사이에 백금선을 넣어 이것을 통해 열을 가하는 동시에 온도를 감지하여 시간의 변화에 따른 온도의 변화를 측정하여 열전도계수를 측정하는 방법이며, 다음과 같은 식에 의해 구하여진다.

$$k = \frac{Power / L}{4\pi \, \delta T / \delta \ln(t)} \qquad (7)$$

여기서 $L$은 열선의 길이, $\delta T$는 온도의 변화량이며, $\delta \ln(t)$는 log scale 로 나타내어진 시간 변화량을 나타낸다. 에폭시에 대해서도 같은 크기의 시편을 제작하여 실험하였다. CST 에서 받은 라드의 길이방향의 열전도계수와 실험을 통하여 얻은 나머지 두 열전도계수를 Table 2 에 나타내었다.

**Table 2 Thermal conductivity of rod and matrix**

| Unit | $k_{r.1}$ | $k_{r.2}$ | $k_m$ |
|---|---|---|---|
| W/mK | 5.675 | 0.337 | 0.189 |

### 4.2 SRC 시편의 열전도계수 측정

시험에 필요한 시편의 크기는 50x40x10(mm)이므로, 각 방향의 열전도계수를 구하기 위해서는 그 방향의 두께가 10(mm)가 되는 시편을 제작하여야 하며, 정확한 데이터를 얻기 위해서는 가능한 많은 시편을 필요로 한다. 그러나 제작 시간이 많이 소요되기 때문에 본 연구에서는 Z 방향의 열전도계수만을 실험을 통하여 구하였으며, 3 쌍의 시편을 제작하였다. 성형 조건과 실험 방법은 일방향 복합재의 것과 동일하게 적용하였다. 성형 후의 4-D SRC 는 Fig. 11 과 같다. 0°, 60°, 120°방향의 라드는 직경이 0.67mm 인 것을 사용하였고, Z 방향으로는 1.33mm 의 라드를 사용하였다. 실험을 통하여 얻은 Z 방향의 열전도계수는 $k_{zz}$ = 1.735 W/mK 이다.

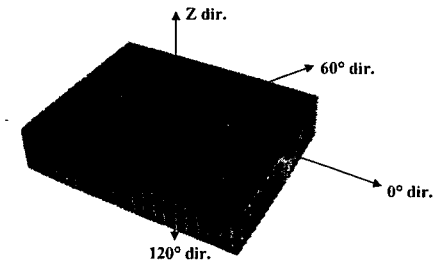


**Fig. 11 A 4-D specimen after curing and cutting.**

## 5. 예측 결과와 실험 결과의 비교

실험에서 구한 라드와 에폭시의 열전도계수를 이용하여 체적평균법과 열저항법으로 SRC 의 Z 방향 열전도계수를 구하였고, 실험결과와 비교하였

으며, 그 결과를 Fig. 12 에 나타내었다.

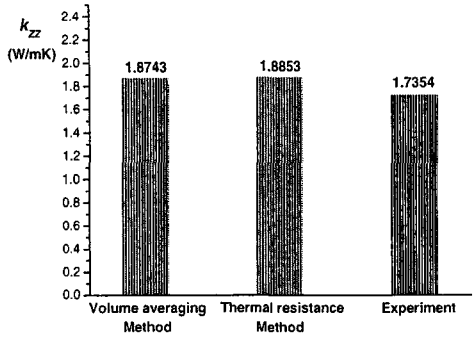


**Fig. 12 Comparison between the predictions and the experiment.**

예측결과와 실험결과가 차이를 보이는 것의 주요 원인은 시편 내에 존재하는 기공량과 그 분포로 인한 것으로 보인다. 시편 내에 있을 수 있는 기공을 제거하기위해 탈포제를 사용하였고, 진공도 잡아주었으나 기공을 완전히 제거하지는 못하였다. 그리고 라드의 직경이 균일하지 못하여 예측에 사용된 각 방향의 체적비와 실제 시편에서의 각 방향으로의 체적비가 다른 것도 이런 차이의 원인인 것으로 보이며, 예측식을 구성할 때 사용한 두 가정도 실제를 이상화한 것이어서, 이것에 대한 오차도 존재한다. 하지만 예측 방법의 차이는 있으나, 예측결과와 실험결과는 10%이내에서 일치함을 보여주었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 체적 평균 개념과 열 저항 개념을 사용하여, 공간적으로 보강된 복합재의 열전도계수를 예측하고, 이를 실험과 비교하여, 예측결과가 실험치와 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다. 그리고 3-D 및 4-D SRC 의 열전도계수를 예측하여 공간적으로 나타냄으로써, SRC 가 가지는 열전도 특성을 알 수 있었다. 공간적으로 보강된 복합재는 실제로 탄소/탄소 복합재로 만들어지고 있으며, 탄소 모재가 가지는 이방성과 그로 인한 물성치 측정의 어려움이 있지만, 정확한 측정이 이루어지면 탄소/탄소 SRC 에도 적용이 가능하리라 사료된다.

## 참고문헌


(1) Q. G. Ning and T. W. Chou, " A Closed-Form Solution of the Transverse Effective Thermal Conductivity of Woven Fabric Composites," *Journal of Composite Materials*, Vol. 29, No. 29, 1995, pp. 2280-2294.

(2) A. Dasgupta, " Three-dimensional modeling of woven-fabric composites for effective thermo-mechanical and thermal properties," *Composites Science and Technology*, Vol. 56, 1996, pp. 209-223.

(3) G. Teters and A. Kregers, "Effective Thermal Properties of Spatially Reinforced Fibrous Composite Materials," *Proceedings of the Second Baltic Heat Transfer Conference 1995*, 1995, pp. 493-502.

(4) H. Tai, " Equivalent Thermal Conductivity of Two- and Three-Dimensional Orthogonally Fiber-Reinforced Composites in One-Dimensional Heat Flow," *Journal of Composites Technology & Research*, Vol. 18, No. 3, 1996, pp. 221-227.

(5) Springer and Tsai, "Thermal Conductivities of Unidirectional Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 1, 1967, pp. 166-173.

(6) Z. Hashin, "Analysis of Properties of Fiber Composites with Anisotropic Constituents," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 46, 1979, pp. 543-550.

(7) C. S. Lee and S. J. Kim, " Investigation on the validity of the rule of mixtures," *Proceeding of 99' Korean Society for Composite Materials*, 1999, pp. 111-117.