

유연성 전자모듈에 대한 오토클레이브 시험조건에서의 습기확산해석

한창운*† · 오철민* · 홍원식*

* 전자부품연구원 부품소재물리연구센터

Moisture Diffusion Analysis for Bendable Electronic Module Under Autoclave Test Condition

Changwoon Han*†, Chulmin Oh* and Wonsik Hong*

* Components & Materials Physics Research Center, Korea Electronics Technology Institute

(Received December 2, 2011 ; Revised February 22, 2012 ; Accepted February 23, 2012)

Key Words: Bendable Electronic Module(유연성 전자모듈), Moisture Diffusion Analysis(습기확산해석), Autoclave Test(오토클레이브 시험)

초록: 이동용 전자기기에 적용 가능한 유연성 전자모듈이 롤투롤 공정에 의해 개발되었다. 개발된 전자모듈은 최 외곽의 두 폴리이미드 층과 그 사이의 동선과 이방성도전필름과 박막 실리콘 칩과 모듈의 봉지재 역할을 하는 접착재료로 구성된다. 개발된 유연성 전자모듈의 신뢰성을 평가하기 위하여 열충격 시험, 고온고습 시험, 오토클레이브 시험을 수행하였다. 시험수행 결과 두 시험에서는 문제가 발생하지 않았으나, 오토클레이브 시험에서는 대부분의 시편 모듈 내에 박리가 발생하였다. 발생한 박리의 고장 메커니즘을 연구하기 위하여 봉지재의 흡습 관련 물성치를 실험적으로 분석하고 오토클레이브 시험조건에서의 모듈 내 습기확산과정을 범용 유한요소 프로그램을 이용하여 분석하였다. 해석결과로부터 오토클레이브 시험조건에서 모듈 내에 발생하는 습기확산과정을 밝혀낼 수 있었다.

Abstract: A bendable electronic module is developed for a mobile application by using a low-cost roll-to-roll manufacturing process. In the module, a thin silicon chip is embedded in a polymer-based encapsulating adhesive between flexible copper clad polyimide layers. A set of tests are conducted for the purpose of qualification: thermal shock, high temperature storage, and autoclave tests. During the autoclave test, delamination occurs at many places within the module layers. To investigate the failure mechanism, moisture diffusion analysis is conducted for the interior of the module under the autoclave test condition. For the analysis, the hygroscopic characteristics of the encapsulating materials are experimentally determined. Analysis results indicate the moisture saturation process in the interior of the module under the autoclave test condition.

1. 서 론

전자제품의 융복합화와 휴대성에 대한 끊임없는 요구 증가에 따라 전자부품의 소형화와 고집적화에 대한 요구도 계속적으로 확대되고 있다. 최근에는 유연성 있는 전자제품의 필요성에 따라 유연 PCB, 플렉서블 디스플레이 등 유연성 전자부품에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.

본 논문에서는 최근에 연구개발된 유연성 전자모듈⁽¹⁾에 대한 흡습특성을 연구하였다. 개발된 전자모듈은 인증시험 중 오토클레이브 시험에서 고장이

발생하였다. 오토클레이브 시험은 고온고압에서 수행되며 특히 최악의 습기환경을 조성한다. 본 연구에서는 오토클레이브 시험에서 습기가 유연성 전자모듈에 어떻게 확산이 일어나는지를 범용 유한요소 프로그램으로 해석을 수행하였다. 해석 결과는 오토클레이브 시험 상태에서 발생하는 구조물의 변형 해석을 위한 데이터로 이용될 것이다.

2. 유연성 전자모듈의 인증시험

개발된 유연성 전자모듈은 Fig. 1과 같은 형상을 가지고 있다. 전자모듈 내의 실리콘칩의 두께는 50 μm이고, 모듈의 봉지재로 역할 하는 접착

† Corresponding Author, cw_han@keti.re.kr

재료(Adhesive)의 두께는 75 μm이다. 접착재료 상하에 폴리이미드(Polyimide: PI)층이 있다. 실리콘 칩의 골드 범프(Au bump)는 이방성도전필름 (Anisotropic Conductive Film: ACF)의 경화에 의해 동선(Copper line)과 전기적으로 연결된다.

개발된 유연성 전자모듈의 신뢰성을 검증하기 위하여 Table 1에 제시된 일련의 인증시험을 수행하였다. 인증시험은 총 3가지 시험으로 -55°C와 125°C의 온도 조건에서 각 10분씩 반복 수행한 열충격 시험, 85°C, 85%RH 조건에서 수행한 고온고습 시험, 121°C, 100%RH, 2기압 조건에서 수행된 오토클레이브 시험으로 구성되었다. 시험결과 시험 모듈은 열충격 시험과 고온고습 시험은 고장 없이 인증 시험을 통과하였으나 오토클레이브 시험에서는 다량의 고장이 발생하였다.

오토클레이브 시험에서 고장이 발생한 모듈에 대한 고장분석 결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이 실리콘 칩 주위에서 많은 박리(Delamination)현상이 발생함을 확인할 수 있었다. 이런 박리현상은 125°C까지 수행하는 열충격 시험에서는 발생하지 않았기 때문에 오토클레이브 시험의 습기 환경이 고장의 주요 인자로 분석될 수 있다. 이 습기인자에 대한 영향분석을 위해 습기확산해석을 수행하였다.

3. 습기확산해석

습기확산해석은 유연성 전자모듈의 습기 특성

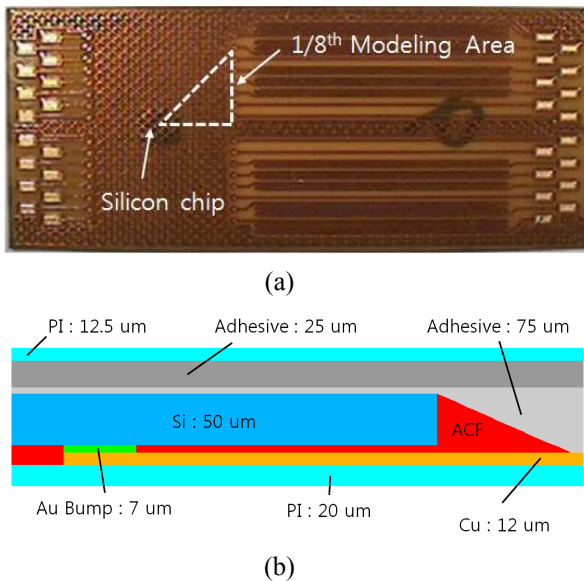


Fig. 1 Developed bendable electronic module (a) and its cross section at silicon chip area (b)

을 규명해서 전자모듈에 대한 열흡습 하중조건에서의 구조해석 접근방법을 결정하기 위한 해석이다. 만약 전자모듈의 습기확산 특성이 오토클레이브 시험에 대해서 과도응답적(Transient)특성이 강하다면 열흡습구조해석을 과도응답을 고려하여 수행해야 하며, 만약 시간에 대해서 충분히 정상상태적(Steady-state)이라면 열흡습구조해석을 정상상태에서 수행할 것이다.

오토클레이브 시험조건에서의 습기확산해석은 범용 유한요소프로그램인 ANSYS를 사용하였다. ANSYS는 습기확산해석에 대한 솔루션을 아직 제공하지 않는다. 그러나 습기확산방정식은 열전달방정식과 동일하기 때문에 열전달방정식을 이용하여 습기확산방정식을 해석할 수 있다.^(2,3) 두 방정식의 유사성(Analogy)에도 불구하고 온도변수는 경계면에서 연속적이지만, 습기밀도변수는 경계면에서 불연속성이 발생하기 때문에 두 가지 이상의 재료에 대해서 습기확산해석을 위해서는 추가적인 변수의 정의가 필요하다. 이에 대한 연구는 Yoon,⁽²⁾ Jang⁽³⁾이 수행하였으며 본 논문에서는 Yoon이 제안한 아래 식과 같은 변수를 온도 대신 사용하였다.

$$\Phi = C/S \tag{1}$$

Table 1 Summary of qualification test results

Tests	Conditions	Times	Results
Thermal Shock	-55°C, 10min. /125°C, 10min.	200 cycles	Pass
Damp heat	85°C, 85%RH	96 hours	Pass
Autoclave	121°C, 100%RH, 2atm	96 hours	Fail

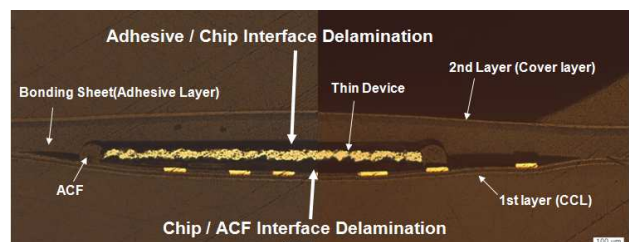


Fig. 2 Failure analysis result after the autoclave test

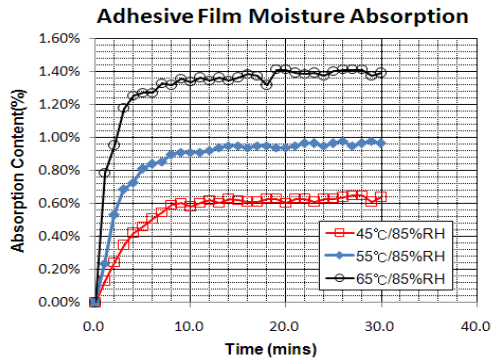


Fig. 3 Moisture absorption test results of adhesive

여기서, C는 습기밀도이고 S는 흡습계수(Solubility)이다.

3.1 습기확산해석을 위한 물성치

유연성 전자모듈의 습기확산해석을 위해 재료 물성치가 필요한 재료는 금속재료를 제외한, Adhesive, ACF, PI로 총 3종이다. 각 재료에 대해서 확산계수 D (Diffusivity)와 흡습계수 S (Solubility)를 실험과 문헌조사를 통해 구하였다. 확산계수와 흡습계수는 아래 식과 같이 정의된다.

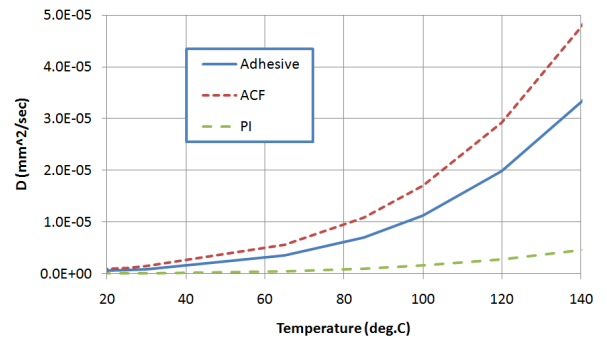
$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_D}{RT}\right) \quad (2)$$

$$S = S_0 \exp\left(\frac{E_S}{RT}\right) \quad (3)$$

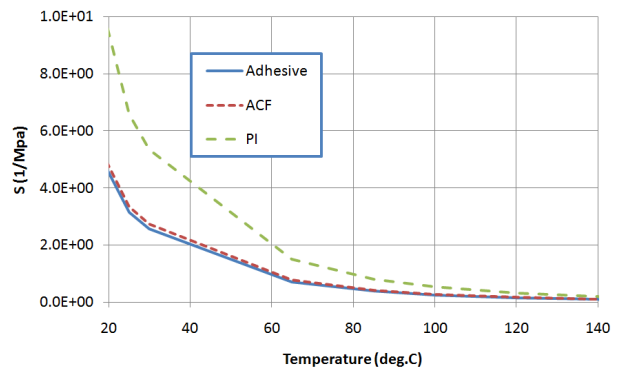
여기서 T는 절대온도이며 R은 기체상수이다. Adhesive 재료의 경우에는 모듈의 개발 과정에서 수행된 Fig. 3과 같은 실험결과를 이용했다.⁽⁴⁾ ACF의 경우 오래전부터 많은 연구가 되어온 재료로 본 연구에서는 참고문헌 [5]에서 제시되는 데이터를 사용하였다. 참고문헌 [5]에서는 3가지 ACF 경우에 대해서 데이터를 제시하였는데 여기서는 3개 값을 평균하여 사용하였다. PI의 경우에도 오래전부터 많은 연구가 되어온 재료이지만, 흡습관련 데이터는 제한적으로 문헌에서 찾을 수 있다. 참고문헌 [6]에서는 PI의 D값에 대해서 50°C 80%RH 조건에서 (2~4)E-13 m²/s을 제시하고 있다. 일반적인 폴리머 재료의 활성화 에너지의 크기는 크게 변화하지 않기 때문에⁽⁷⁾ PI의 E_D는 Adhesive와 ACF E_D의 평균값을 사용하고 D값을 상기 참고문헌 [6]의 근거에 의거하여 3E-13

Table 2 Mass diffusion parameters of materials

Item	Adhesive	ACF	PI
D ₀ (m ² /sec)	7.65E-07	7.12E-07	8.61E-08
E _D (J/mol)	3.45E+04	3.30E+04	3.38E+04
S ₀ (1/Pa)	1.02E-11	1.32E-11	2.33E-11
E _S (J/mol)	3.13E+04	3.08E+4	3.11E+4



(a)



(b)

Fig. 4 Moisture diffusion characteristics with temperature; (a) diffusivities and (b) solubilities

m²/s을 사용하면 E_D와 D₀를 구할 수 있다. PI 흡습계수는 제조사의 데이터를 이용하였다.⁽⁸⁾ 최종적으로 구한 확산 및 흡습계수 데이터가 Table 2에 정리되어 있다.

Fig. 4(a)는 세 재료에 대해서 온도에 대한 확산계수 값의 변화를 보여준다. 동일한 온도조건에서 습기의 확산도는 ACF가 가장 빠르고, 그 다음이 Adhesive이며, PI가 가장 느려 외부의 습기를 막아주는 역할을 할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 세 재료에 대해서 온도에 대한 흡습계수 값의 변화를 보여준다. 동일한 온도조건에

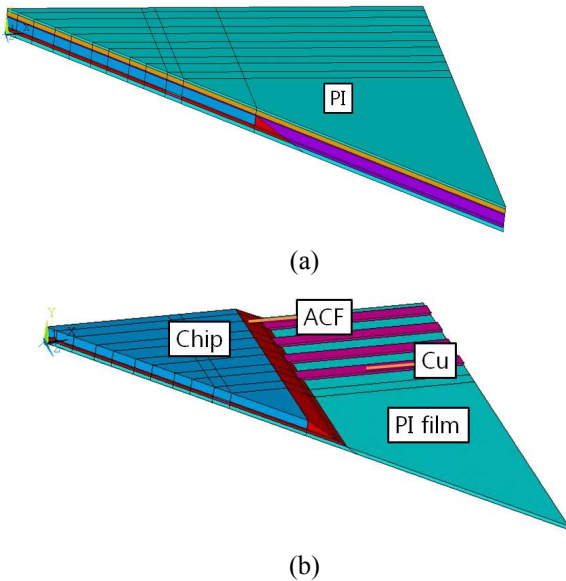


Fig. 5 Modeled bendable electronic module

서 PI의 흡습계수 값이 다른 두 재료에 대해서 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 이는 PI층이 먼저 흡습되는 습기를 많이 획득하여 내부 층을 습기로부터 보호할 수 있음을 의미한다.

3.2 해석결과

오토클레이브 시험의 해석을 위한 유한요소 모델은 Fig. 5에 나타나 있다. 모델링은 Fig. 1에 점선으로 표시된 박리가 발생한 실리콘칩 영역에 대해서 수행하였다. 하중과 기하학적 대칭조건을 고려하여 1/8 대칭모델을 만들었다. 모델에 대한 해석 하중조건은 C/S 값으로 설정한다. 오토클레이브 시험조건(121°C)에서 PI의 확산계수 D는 2.84E-6 mm²/sec이고, 흡습계수 S는 3.09E-11/MPa이다. C_{sat} = S×RH×P_{sat}로 정의되고 (여기서 C_{sat}는 포화습기밀도, P_{sat}는 포화증기압), 오토클레이브 시험조건에서 포화증기압은 2 atm (= 0.202650MPa)이다. 따라서 하중조건은 C_{sat}/S = RH×P_{sat} = 0.202650 MPa이다.

습기확산해석을 위한 유한요소모델의 Time Step 크기 결정은 아래 식에 의해 결정하였다.⁽⁹⁾

$$\Delta t = \beta(\Delta x)^2 \frac{\rho C}{k} \tag{4}$$

여기서

$$k = DS = 2.04E-5 \times 1.45E-1 = 2.96E-6$$

$$\rho C = S = 1.45E-1$$

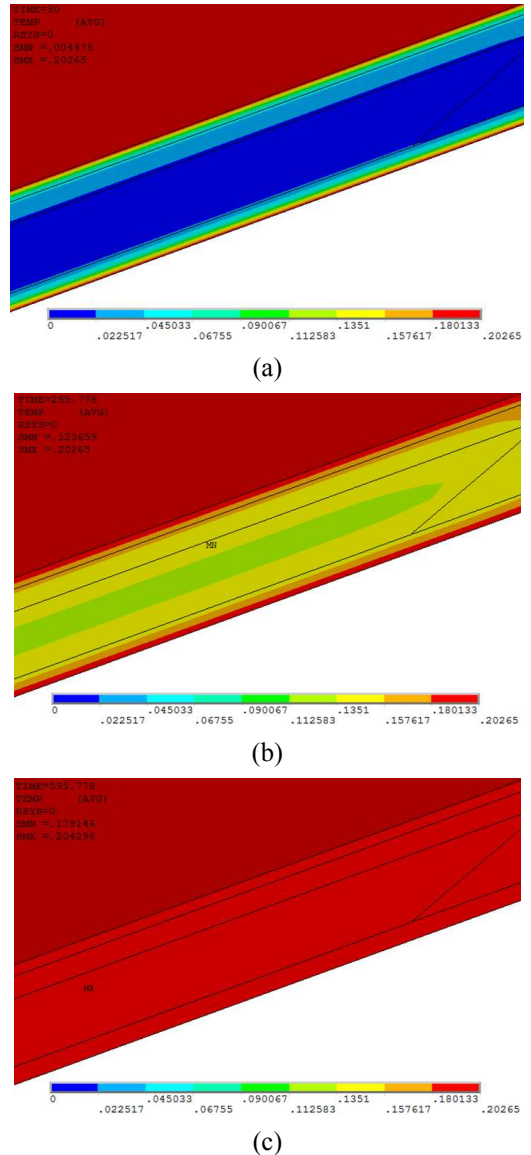


Fig. 6 Moisture diffusion analysis result plots at (a) 30 seconds, (b) 296 seconds, and (c) 596 seconds

$$\Delta x = 0.05 \text{ mm}$$

$$\beta = 0.1 \sim 0.5$$

이다. 따라서 Time Step인 Δt를 10초 ~ 60초 범위에서 해석을 수행하였다.

해석 결과는 Fig. 6과 7에 나타나 있다. Fig. 6은 오토클레이브 시험조건에서 10분 정도 후에는 모듈 내부로 모든 습기의 확산이 종결되는 것을 그림으로 보여준다. Fig. 6에서 그려진 변수는 식 (1)에서 C/S로 정의된 변수이다. 이 변수에 재료별 S값을 곱하면 습기밀도가 된다. Fig. 7(a)는 모듈의 두께 방향으로 각 시간별 습기밀도의 변화를 보여준다. 재료와 재료 사이(PI와 Adhesive)에

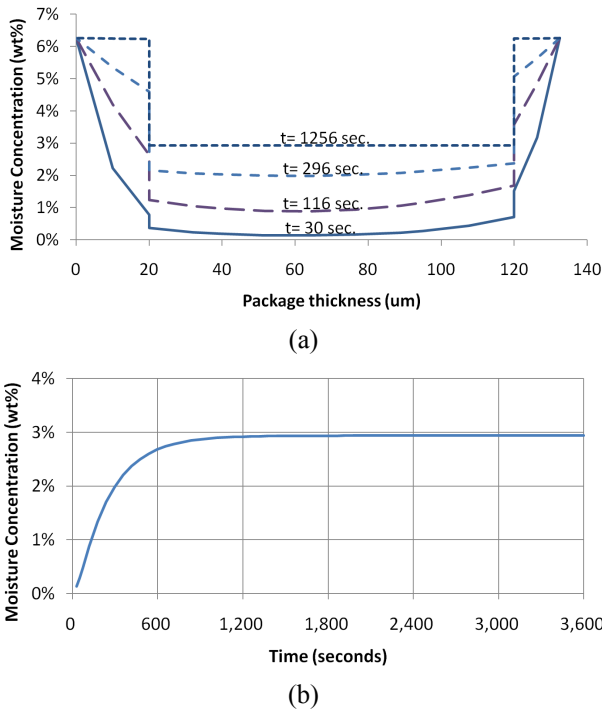


Fig. 7 Moisture diffusion analysis results with time along module thickness(a) and at the center of thickness(b)

습기밀도가 차이가 발생함을 확인할 수 있다. Fig. 7(b)는 모듈 두께 중심 위치(Adhesive)에서 시간별 습기밀도의 변화를 보여준다. 이 그림에서 적어도 10분 후(600초)에는 모듈 모두 포화 상태가 90% 이상 진행되고 30분 후(1,800초)에는 실질적으로 포화가 완성됨을 알 수 있다.

따라서 92시간 진행하는 오토클레이브 시험조건에서는 1 ~ 2시간 초기에 유연성 전자모듈이 완벽히 포화 된다고 간주할 수 있고, 이에 따라 열흡습구조해석은 포화된 습기분포와 온도조건으로 정상상태 해석을 수행할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 최근에 연구·개발된 유연성 전자모듈에 대한 흡습특성을 연구하였다. 개발된 전자모듈은 인증시험 중 오토클레이브 시험에서 고장이 발생하였다. 본 연구에서는 오토클레이브 시험에서 습기가 유연성 전자모듈에 어떻게 확산이 일어나는지를 범용 유한요소 프로그램으로 해석을 수행하였다. 해석 결과 오토클레이브 시험조건에서 10분정도 후에는 모듈 내부로 모든 습기의 확산이 종결되는 것으로 분석되었다. 30

분 후에는 모듈 모두 포화 상태가 되었다. 따라서 1~2시간 초기에 유연성 전자모듈이 완벽히 포화 된다고 간주할 수 있고, 이에 따라 열흡습구조해석은 포화된 습기분포와 온도조건으로 해석을 수행할 수 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부 청정제조기반 산업원천기술개발사업(10031768) 지원으로 수행 되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Wang, G., Cho, Y., Hong, S., Kim, J., Choi, W., Kim, J., Ryu, J., Hong, W. and Oh, C., 2010, "Active-Device-Embedded of Bendable Electronic Module," *12th International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP 2010)*, Singapore, Oct. 2010.
- (2) Yoon, S., Han, B. and Wang, Z., 2007, "On Moisture Diffusion Modeling Using Thermal-Moisture Analogy," *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 129, pp. 421~426.
- (3) Jang, C., Park, S., Han, B. and Yoon, S., 2008, "Advanced Thermal-Moisture Analogy Scheme Anisothermal Moisture Diffusion Problem," *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 130, pp. 011004-1~011004-8.
- (4) Hong, W., Oh, C., Han, C., Wang, G., Hong, S. and Kim, J., 2010, "Moisture Diffusion Coefficient and Activation Energy of Adhesive Film for Flexible Embedded Electronic Module" *12th International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP 2010)*, Singapore, Oct. 2010.
- (5) Ikeda, T., Kim, W.-K. and Miyazaki, N., 2006, "Evaluation of the Delamination in a Flip chip Using Anisotropic Conductive Adhesive Films Under Moisture/reflow Sensitivity Test," *IEEE Trans. On Comp. Pack.*, Vol. 29, No. 3, pp. 551~559.
- (6) Penon, M. G. and Picken, S. J., 2006, "Dielectric Water Sorption Analysis," *Review of Scientific Instruments*, Vol. 77, No. 11, pp. 115107.1~115107.6.

- (7) Wong, E. H., Rajoo, R., Koh, S. W. and Lim, T. B., 2002, "The Mechanics and Impact of Hygroscopic Swelling of Polymeric Materials in Electronic Packaging," *ASME Journal of Electronic Packaging*, Vol. 124, pp. 122-126.
- (8) Dupont, "Summary of Properties for Kapton Polyimide Films," www2.dupont.com/Kapton/en_US/tech_info/index.html.
- (9) Taesung SNE, "ANSYS Heat Transfer Instruction Manual," p.216.