

원형 및 사각단면을 가지는 수평캡슐에서의 접촉용해에 관한 실험적 연구

김 시 범* · 이 치 우**

* 동아대학교 기계공학과

** 대우국민차 기술연구소

An Experimental Study on Close-Contact Melting in Horizontal Capsules with Circular or Rectangular Cross Sections

Si-pom, Kim* · Chi-woo, Lee**

* Dept. of Mechanical Eng., Dong-A Univ.

** Test Lab., Daewoo Public Motors Co.

요 약

본 연구는 원 및 여러가지 종횡비의 사각단면을 가지는 수평캡슐에서의 접촉용해에서 용해현상의 진행모습, 용해율 및 상부에서의 자연대류의 정성적인 경향을 고찰한 실험적 연구이다.

본 연구의 결과 Stefan수에 따라서 용해율이 증가하며, 동일한 단면적의 경우 원보다는 사각단면의 경우에 용해율이 크고, 사각단면의 경우에는 종횡비가 작을수록 용해율이 커짐을 알 수 있다. Stefan수가 각각 0.0772, 0.1287 및 0.1802일 때 원통캡슐의 경우 상부에서 자연대류가 용해율에 미치는 영향은 각각 6.1%, 8.6% 및 11.2%이다.

ABSTRACT

This empirical paper addresses the phenomena of the contact melting of PCM in horizontal capsules of circular and rectangular cross sections with various aspect ratio.

The melting-rate tends to increase as the Stefan number increases. The case of rectangular tube displays larger melting-rate than that of circular tube, and the melting-rate

increases as the aspect ratio decreases for rectangular tubes. In case of circular tube, the effect of natural convection on the melting-rate is 6.1%, 8.6% and 11.2% according to Stefan number 0.0772, 0.1287 and 0.1802 respectively.

I. 序 論

에너지 자원을 유효하게 이용하는 방법으로 태양열, 지열 풍력 및 해양온도차 등의 각종 자연 에너지와 공장의 폐열 및 소각열 등의 이용 방안이 관심의 대상이 되고 있다. 이들 에너지 자원을 이용하기 위해서는 먼저 회박성, 간헐성, 저온 열원이라는 문제점들을 극복하여야 한다. 이를 위해서 에너지 저장 시스템의 연구 개발이 활발하게 진행되고 있다.

현재 축열방법은 크게 나누어서 물 등을 이용하는 현열축열과 상변화물질(Phase Change Material:PCM)의 잠열을 이용한 잠열축열로 나누어진다. 잠열축열 시스템은 현열축열에 비해 축열밀도가 커서 공간을 적게 차지하고, 상변화 온도 부근에서 대부분의 에너지를 방출하는 장점이 있기 때문에 일정한 온도에서 열을 얻을 수 있으므로, 최근에 각 방면에서 관심의 대상이 되고 있다.¹⁾ 잠열축열 시스템에서는 대부분 캡슐 등 밀폐된 공간 내에 PCM을 채워 넣고, 응고와 용해를 반복시키기 때문에 밀폐된 공간 내에서 상변화를 동반하는 열전달의 해석이 중요하다. 응고과정에서는 열전도가 지배적이므로 그 현상이 실험 또는 해석적으로 비교적 잘 알려져 있다. 그러나 용해과정에서 특히 PCM의 중심을 고정하지 않은 경우에 고상과 액상의 밀도차에 의해서 아직 녹지 않은 고상부가 액상중에서의 부력에 의해 침강 혹은 부상하게 된다. 따라서 용기벽면과 고상부의 사이에 얇은 액막이 형성되어 접촉용해(Close-Contact Melting)가 발생한다. 최근에는 여러가지 형태의 캡슐내에서 중심이 고정되어 있지 않은 PCM의 용해에 관한 연구 결과들이 발표되고 있다. Bareiss와 Beer 등²⁾은 수평 원통 캡슐 내에서 일어나는 접촉용해

열전달의 형태를 열전도로 가정하고 용해율을 구하는 근사이론을 제시하였고, Moallemi, Webb 및 Viskanta 등³⁾은 접촉용해가 일어나는 액막에서의 용융된 액체의 유동효과를 고려한 근사해 실험을 하였으며, 加藤 和三과 齊藤 武雄 등⁴⁾은 원통캡슐의 접촉용해에 관한 실험적 연구를 하였다. 그리고 平田 哲夫 등⁵⁾은 수평으로 놓여진 사각형 용기내에서 접촉용해 특성을 특성을 근사해석하고 실험적으로 검토한 바 있다.

본 연구에서는 용융이 진행됨에 따라 고액 밀도차에 의해서 고상이 아래로 가라앉는 침강형을 대상으로하여 수평원통캡슐 및 여러 종횡비의 사각단면을 가진 수평 캡슐의 내부에서 용기벽면의 온도가 일정한 조건하에서 중심이 고정되어 있지 않은 고상 PCM이 용해할 때 발생하는 接觸融解를 가시화 하여 용해율을 구하고, 특히 원통 캡슐의 경우에 Stefan수가 상부 액상에서의 자연대류에 미치는 검토하였다.

II. 實 驗

1. 실험 장치

Fig. 1에 실험장치 개략도를 나타내었으며, Fig. 2는 원통캡슐의 경우 축열캡슐의 단면이다. 축열캡슐의 단면의 형상은 원 및 종횡비가 각각 0.44, 1, 2.3인 사각형으로 총 4종류이며, 단면적은 모두 동일하다. 이들 캡슐내에 상변화물질을 넣고서 균한 다음 접촉용해 시킨다. 용해된 파라핀은 대기에 노출될 때 많은 양의 공기가 용해되며, 이미 용융 파라핀 속에 잔재하고 있는 공기는 보조용기에 넣고서 진공펌프로써 뽑는다. 파라핀이 굳을때 발생하는 수축에 따른 보충파라핀 공급하기 위해서 니크롬선을 감아 등온을

유지할 수 있도록 보조용기를 충전캡슐 위에 연결시켰다. Fig. 3은 실험장치의 전체적인 사진으로 보조용의 재질은 동이며, 규격은 직경 130 mm, 높이 150mm인 원통이다. 또한 공기가 제거되는 과정을 확인하기 위하여 덮개유리를 부

착하였다. 등온경계조건을 만족하기 위하여 충전캡슐의 재질은 동으로 하였으며, 원통캡슐의 규격은 직경 63mm, 길이 200mm로 하였으며, 사각형단면의 경우에는 원통캡슐과 단면적이 같고 종횡비가 다른 형상으로 하였다. 또 각각의

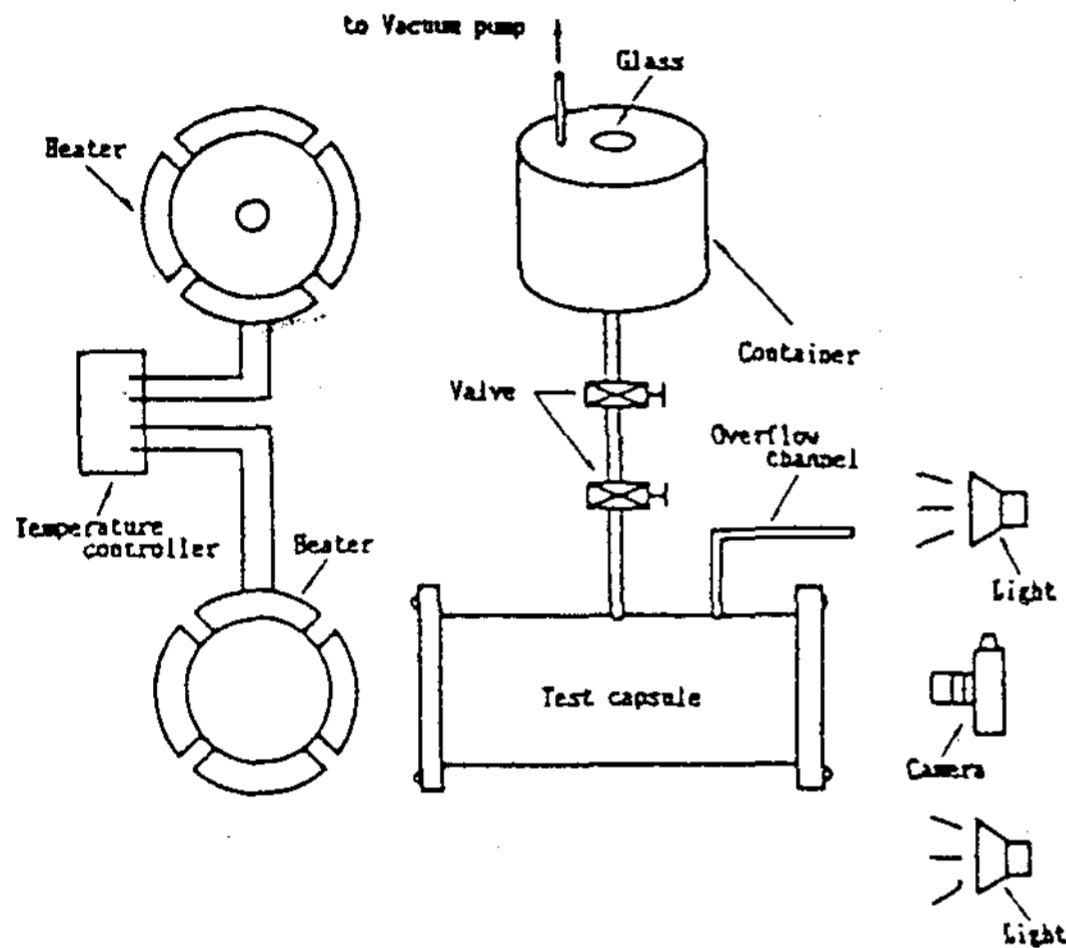


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

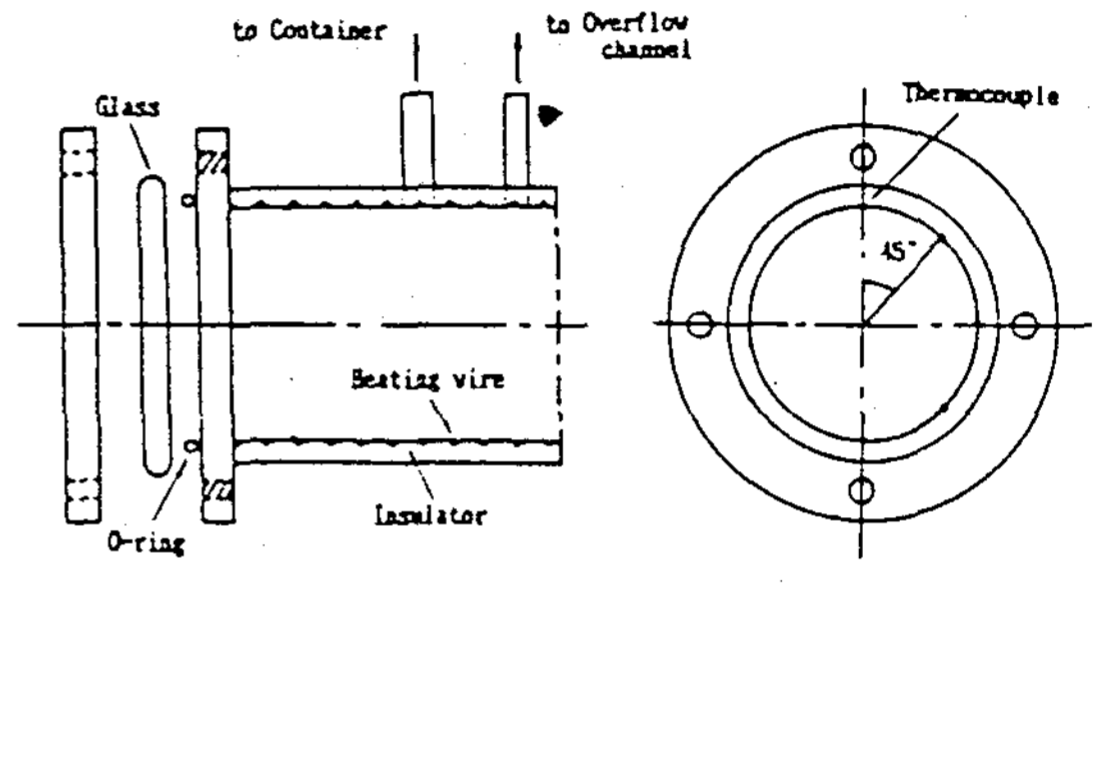
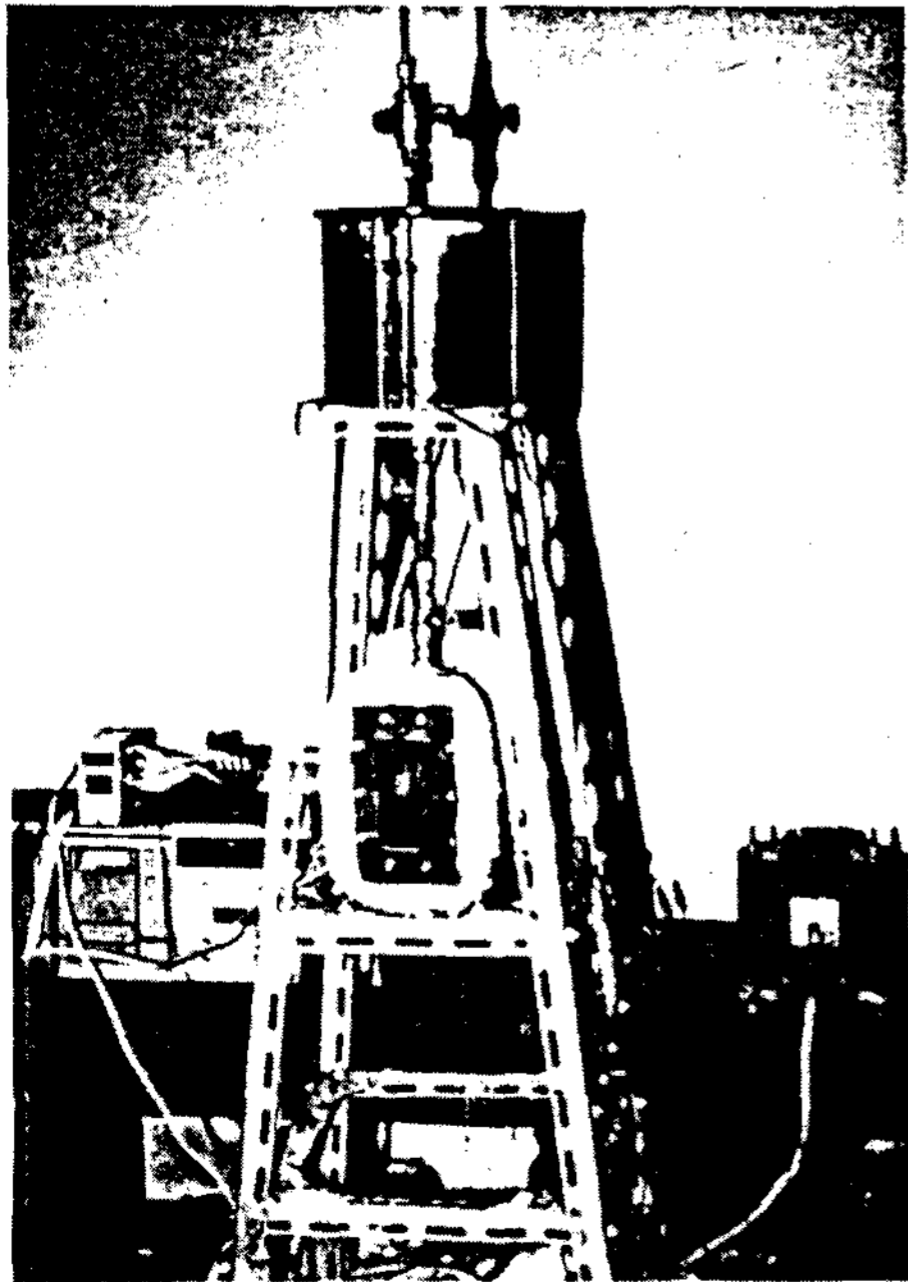
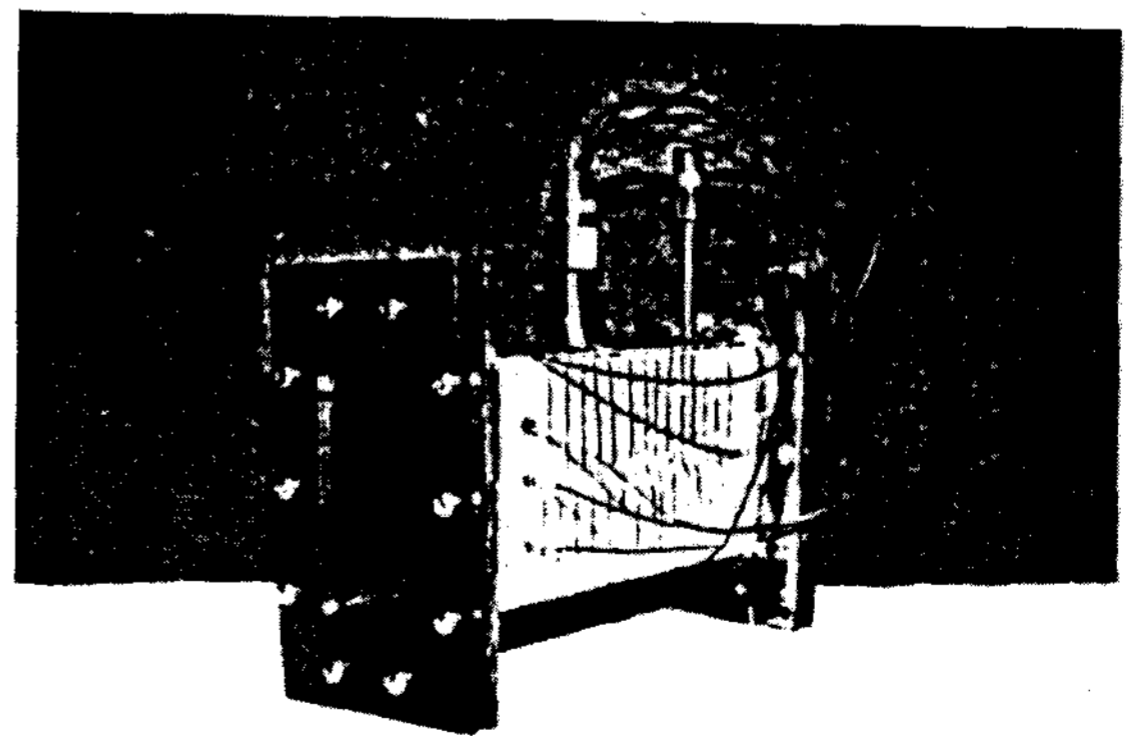


Fig. 2. Details of test section for circular capsule



(a) Experimental apparatus



(b) Test section for rectangular capsule

Fig. 3. Photographs of experimental setup

충전캡슐 상부에 6mm관을 연결하여 상변화에 따른 부피의 증가분이 빠져 나가도록 overflow channel을 설치하였다. 충전캡슐의 양단면에 두께 5mm 강화유리판을 설치하여 축방향으로 사진촬영이 가능하도록 하였으며, 강화유리면과 동캡슐의 접촉부에는 고무 O링을 끼워서 5mm bolt로 체결 밀봉하였다. 각각의 충전캡슐에는 직경 0.8mm의 니크롬선을 8mm간격으로 촘촘히 감아 1kW 용량으로 열을 가했으며, 외표면에는 세라믹 울을 사용하여 단열하였다. 등온 상태를 확인하기 위하여 캡슐의 외표면에 축대칭으로 5곳에 CA 열전대를 부착하였으며, 상부에서 세 번째 열전대를 이용하여 온도조절기로써 캡슐 표면의 온도를 변화, 조정하였다. 전위차계로써 충전캡슐의 등온상태임을 확인하였으며, ISO 16 저감도 필름을 사용 접사용 카메라로 촬영하였으며, 백열전구를 전면에 2곳, 후면에 1곳 두어서 직접 조명하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 파라핀은 융점이 51°C이다. 파라핀은 대체적으로 200°C 이상의 온도로 가열하면 물성치에 변화가 생기게 되므로⁽¹⁶⁾ 60°C 정도에서 녹힌 다음 보조용기에 넣는다. 80°C로 유지한 상태에서 진공펌프로써 파라핀내에 녹아있는 공기를 뽑아내고 충전캡슐로 천천히 유입시킨다. 이 때 충전캡슐도 진공상태(진공도 400 Torr)이며, 유입과정에서도 기포발생이 일어나지 않도록 밸브를 조금씩 열어준다. 응고과정에서 두드러지게 나타나는 현상중 파라핀의 상변화시에 발생하는 수축을 보상하기 위해 충전캡슐에는 응고가 진행되도록 하면서 보조용기 속에는 용융된 파라핀이 충전캡슐로 계속 유입 보충된다. 파라핀이 완전히 굳은 다음 본 실험을 시작하기 전에 접촉용해가 가능하도록 충전캡슐의 양단면의 유리판을 분리한 후 고상의 PCM과 유리판이 분리된 상태임을 확인한 후 재결합하여, 충전캡슐을 50°C에서 30분동안 유지시킨 다음 실험을 시작하였으며, 실험개시후

20분부터 10분마다 촬영하였다.

본 실험의 조건은 다음과 같다.

형 상 : 원 및 종횡비가 각각 0.44, 1 및 2.3인 사각형으로 총 4종류이며 모두 단면적이 동일하다.

온도조건 : $Ste=0.0772(\Delta T=7.5^\circ C)$, $Ste=0.1287(\Delta T=12.5^\circ C)$, $Ste=0.1802(\Delta T=17.5^\circ C)$ 의 3경우로 용기벽의 온도 T_w 는 일정하며 ΔT 는 T_w 와 융점온도와의 차이이다.

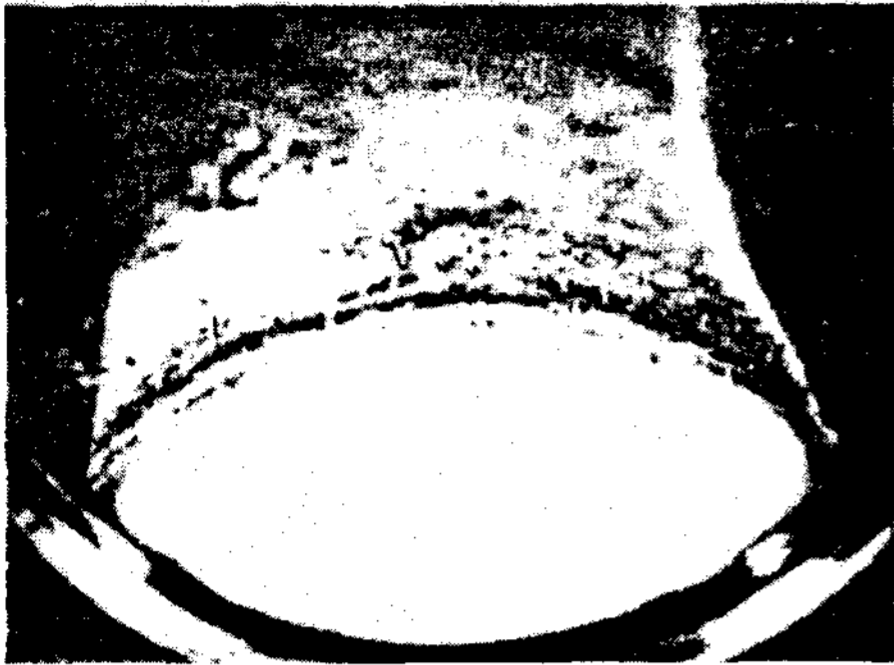
본 실험에 사용된 파라핀은 비열 2.1 kcal/kg°C, 잠열 204 kJ/kg인 PW-134형이다.

III. 結果 및 考察

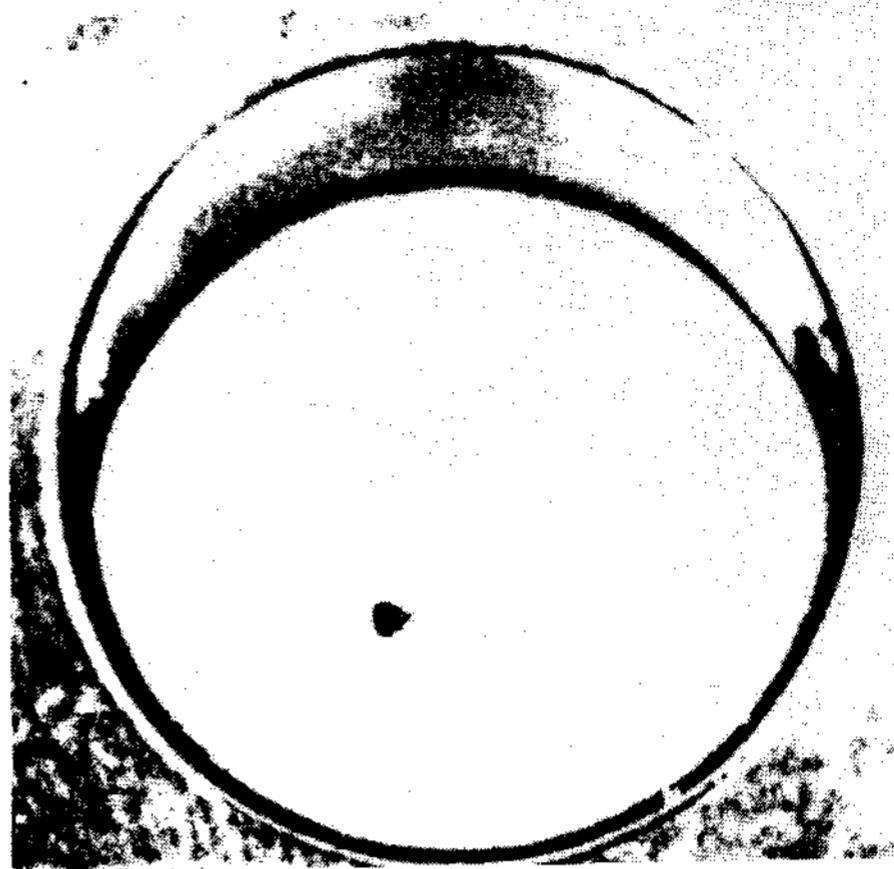
1. 전체적인 경향

Fig. 4에는 실험결과의 일반적인 경향이 나타나 있다. Fig. 4 (a)는 본 실험에서 단면방향의 2차원성이 유지 되는가를 확인하기 위해 촬영한 것이다. 사진에서 보는 것 처럼 축방향으로의 변화는 거의 없었으며, 2차원성이 잘 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 4 (b)~(e)는 각 단면형상 캡슐에서 접촉용해가 일어나는 과정에서 대표적인 사진들이며, Fig. 4 (b)에서 보는 것처럼 접촉용해가 일어나는 하부에 매우 얇은 액층이 형성되며(사진의 검은 색 부분), 그 액층의 두께는 원의 최하부에서 제일 작고 상부로 올라가면서 차츰 커지는 것을 알 수 있다. 상부 원호의 곡율이 용기의 곡율보다도 커지므로 상부에서도 용해가 일어남을 알 수가 있다. Fig. 4 (c)~(e)에서 보듯이 원의 경우와 마찬가지로 바닥 부분에서는 접촉용해가 일어나고 있으며, 고상 상부의 구석부분이 원래의 형태인 직각이 아니고 곡선의 형태로 되는 것으로 보아 상부 및 측면에서도 용해가 있는 것으로 생각된다.

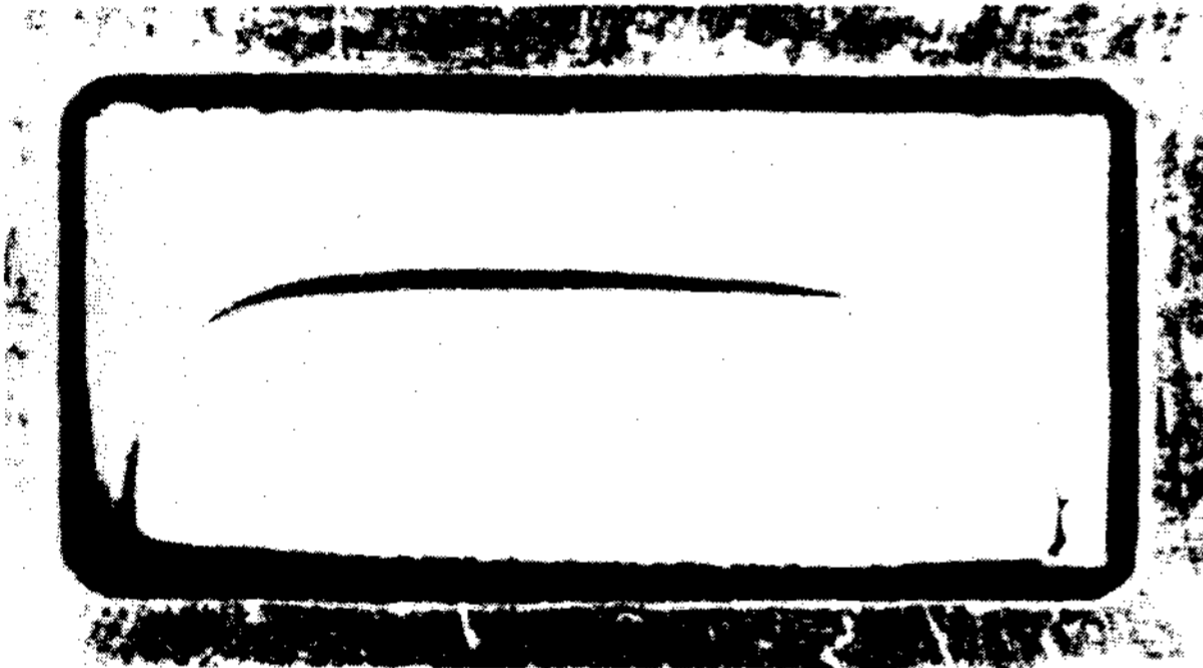
Fig. 5~Fig. 8에는 Stefan수가 각각 0.0772, 0.1287 및 0.1801일 때 원통캡슐 및 종횡비 A가 각각 0.44, 1.0, 2.3인 사각캡슐에서의 실험결과를



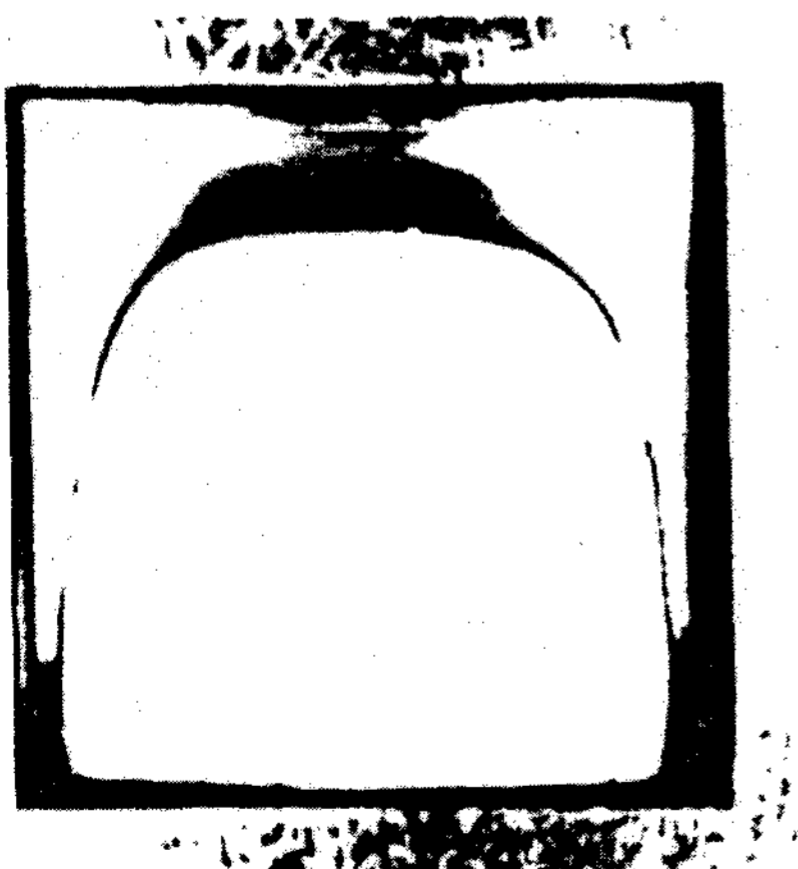
(a) Variation in axial direction



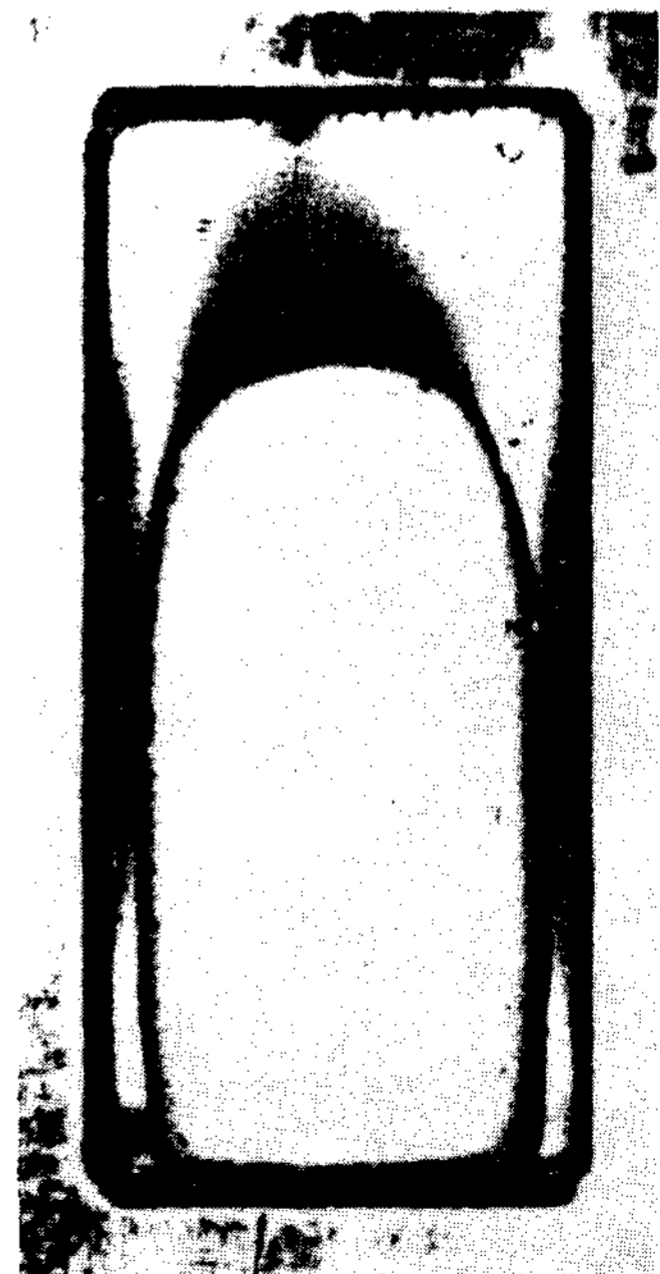
(b) Circular capsule



(c) Rectangular capsule with $A=0.44$



(d) Rectangular capsule with $A=1.0$



(e) Rectangular capsule with $A=2.3$

Fig. 4. Patterns of melting in capsules with various cross section

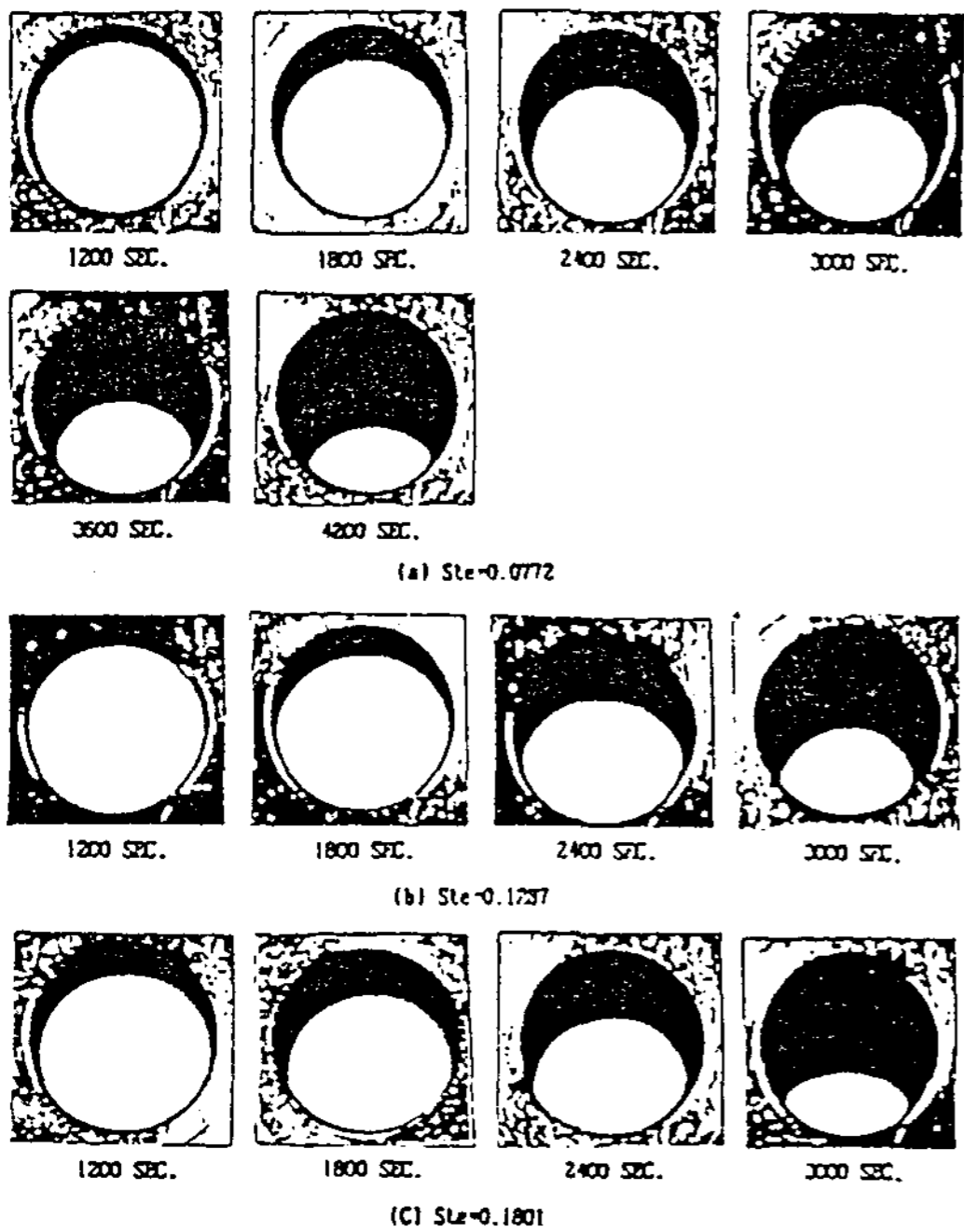


Fig. 5. Photographs of experimental results for circular capsule

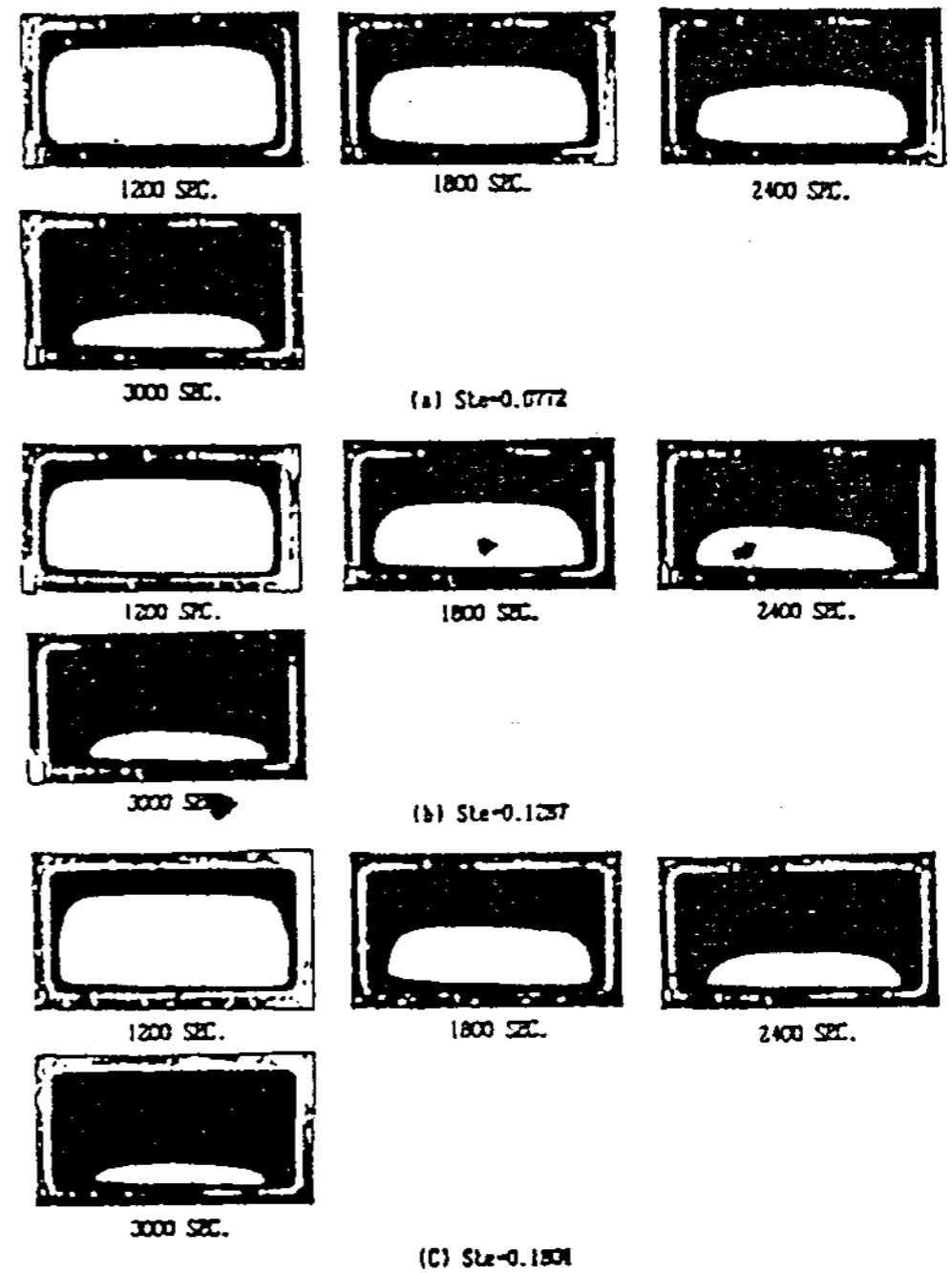


Fig. 6. Photographs of experimental results for rectangular capsule with $A=0.44$

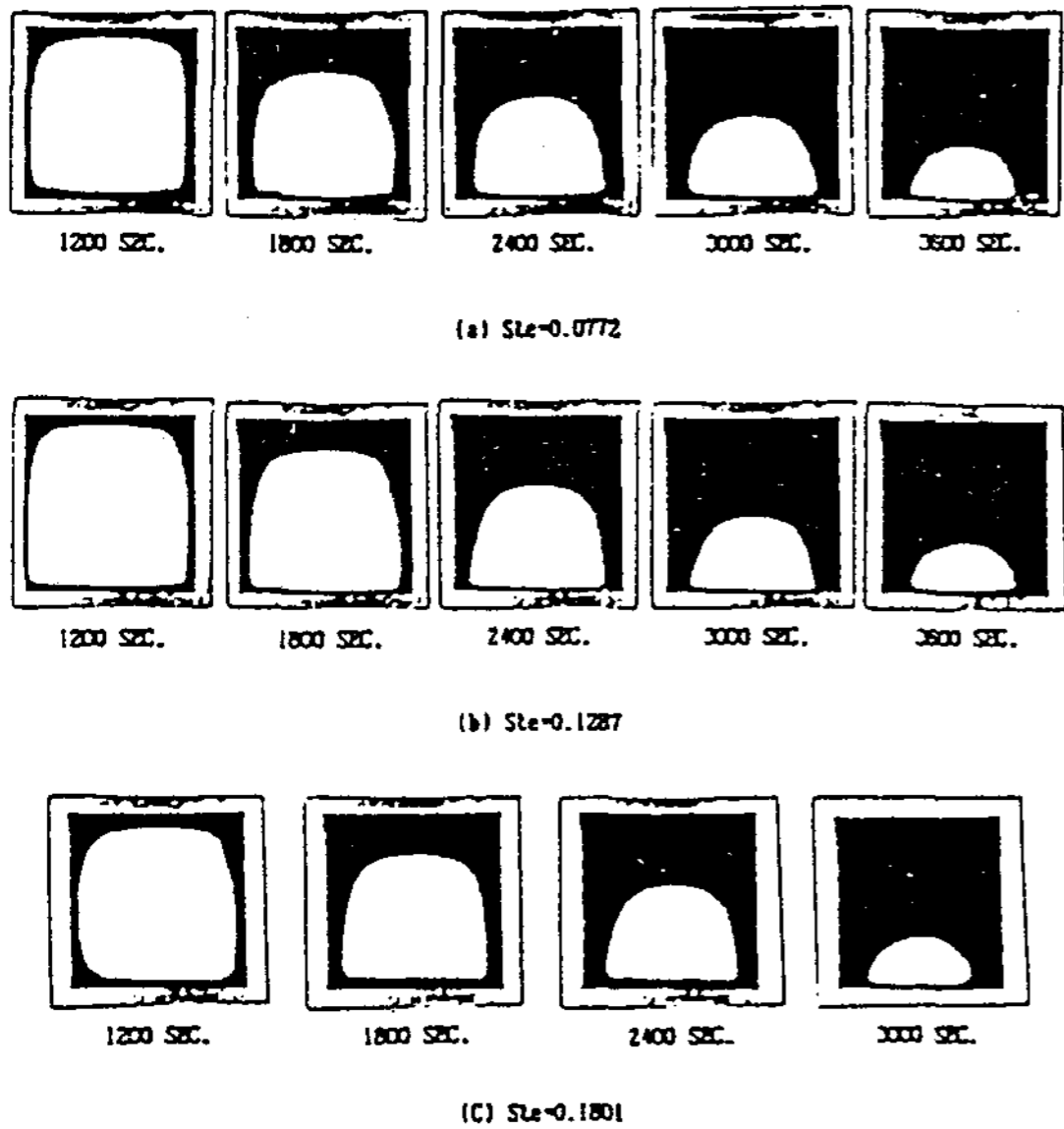


Fig. 7. Photographs of experimental results for rectangular capsule with $A=1.00$

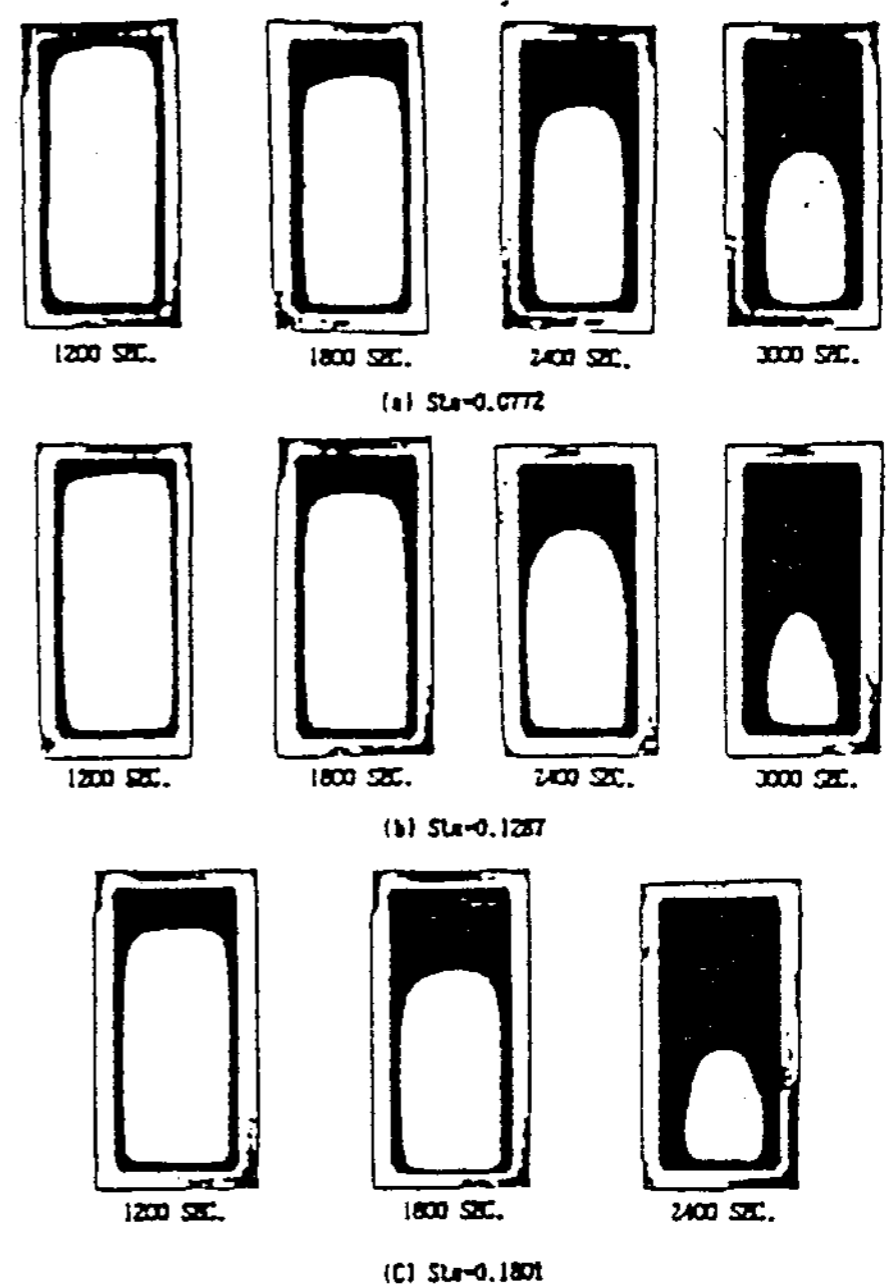


Fig. 8. Photographs of experimental results for rectangular capsule with $A=2.30$

나타내었다. Fig.5에서 보는 것처럼 Stefan수의 증가와 더불어 용해량은 증가하고 있으며, 상부에서도 고상 PCM의 형상의 곡율이 시간이 지남에 따라 커지는 것으로 보아 자연대류 및 열전도에 의한 용해가 있는 것으로 생각된다. 그러나 접촉용해부에서 유동해 나오는 액상 PCM의 흐름이 자연대류를 촉진하며, 대표적 PCM인 파라핀류의 열전도율은 아주 작은 편이므로 상부에서의 용해는 주로 자연대류에 의해 일어난다고 할 수 있다.

Fig.6~Fig.8에서 보는 것처럼 사각캡슐의 경우에는 하부에서의 접촉용해와 더불어 상부 및 측면에서의 용해도 활발하게 일어난고 있음을 알 수 있다. 특히, 측벽과 고상 PCM 사이의 액상의 두께의 증가율을 관찰해보면 종횡비가 커질수록 그 값이 증가함을 알 수 있다. 특히, Fig.8에서 알 수 있는 것처럼 종횡비가 큰 경우에는 상당한 시간이 경과할 때 까지도 고상 PCM의 형상이 거의 사각형 그대로 유지되는데 이는 측면액상의 두께가 상당히 커져서 자연대류가 활발하게 일어나기 전까지는 전체 용해는 주로 하부에서의 접촉용해에 의해 일어나기 때문에 단순 침강이 일어난 결과라고 생각된다.

2. 용해율

M_T 를 PCM의 총질량, M 을 어떤 시각까지의 용융된 양으로 할 때 용해율은 다음 식으로 나타내진다.

$$M_R = \frac{M}{M_T} \quad (1)$$

촬영한 사진으로 용해율을 구하기 위해서 고상부분과 액상부분을 오려서 천칭으로 질량을 측정하여 그 비율을 구하였다. 이 때 사용한 천칭은 정밀도 $10^{-5}g$ 이다. Fig.9~Fig.12에는 각 캡슐에서 Stefan수가 0.0772, 0.1287, 및 0.1801인 경우에 용해율의 시간변화를 나타내었다. Stefan수의 증가에 따라서 용해율은 증가하며, 원의

경우에는 증가하는 그 정도가 작고, 사각형의 경우는 큰 폭으로 증가하였다.

Fig.13~Fig.15은 동일한 PCM 질량을 가지는 4개의 캡슐에서의 용해율의 비교를 나타낸 것이다. 용해율이 큰 순서는 $A=0.44$ 의 사각캡슐, $A=1$ 인 사각캡슐, $A=2.3$ 인 사각캡슐, 그리고

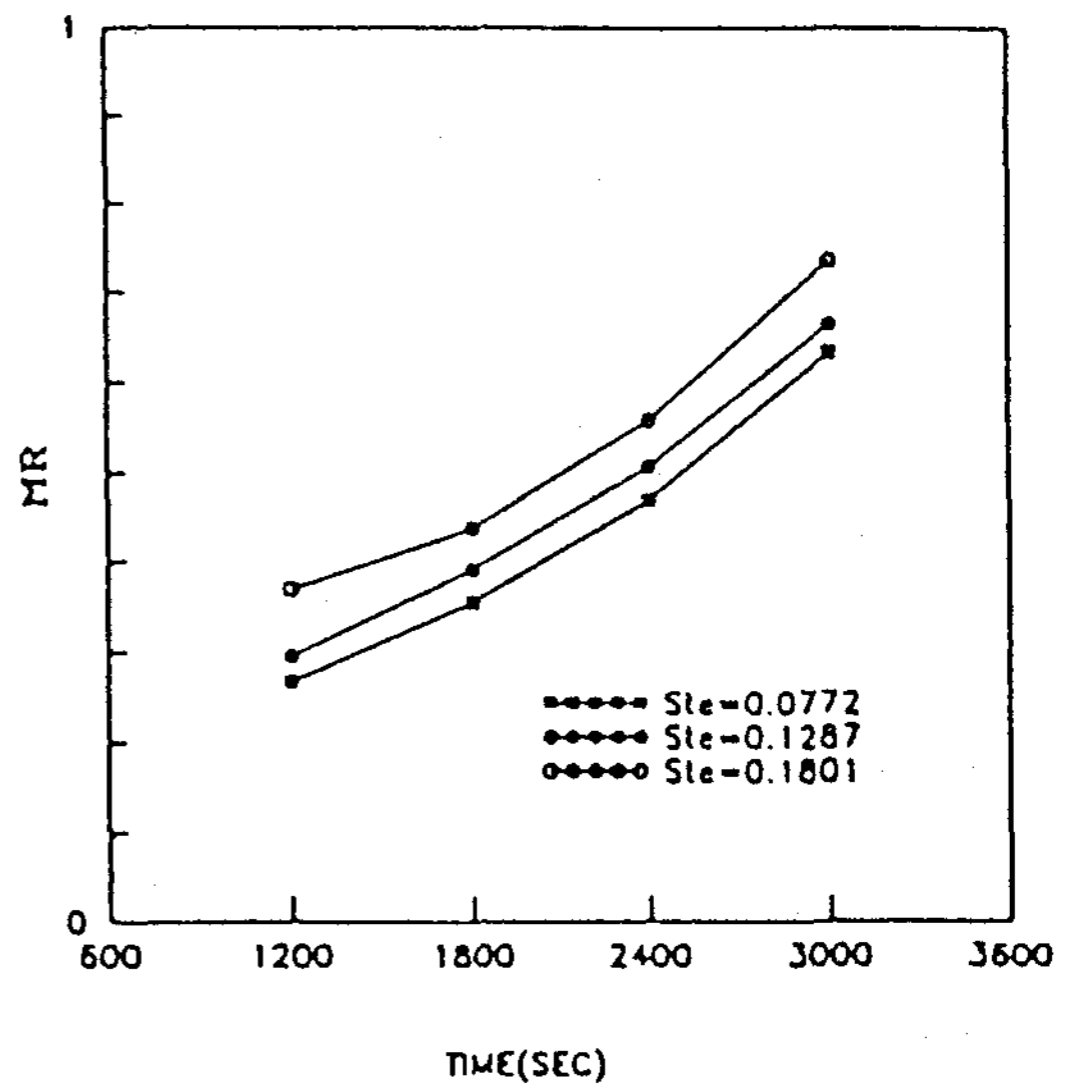


Fig. 9. Timewise variation of the melting rate for circular tube

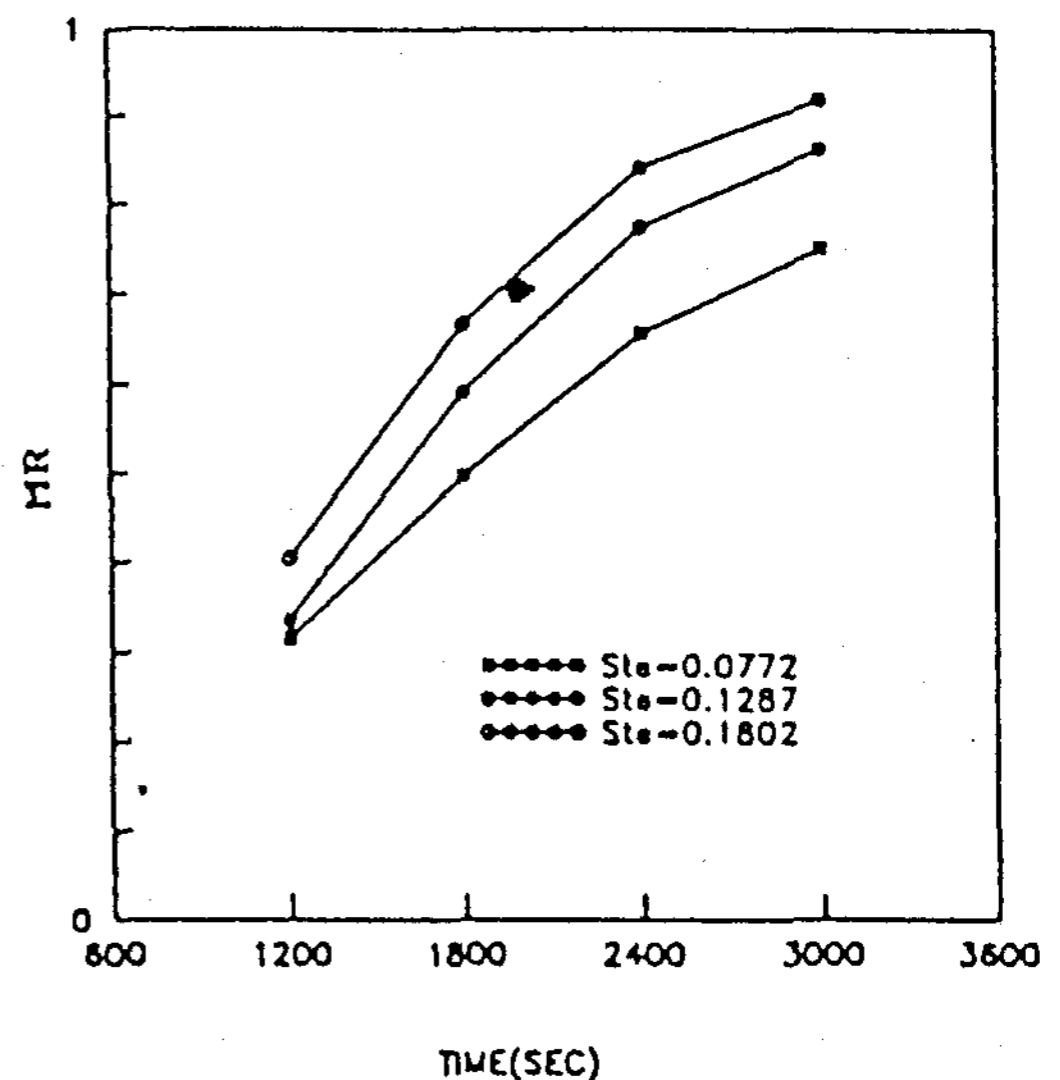


Fig. 10. Timewise variation of the melting rate for rectangular tube with $A=0.44$

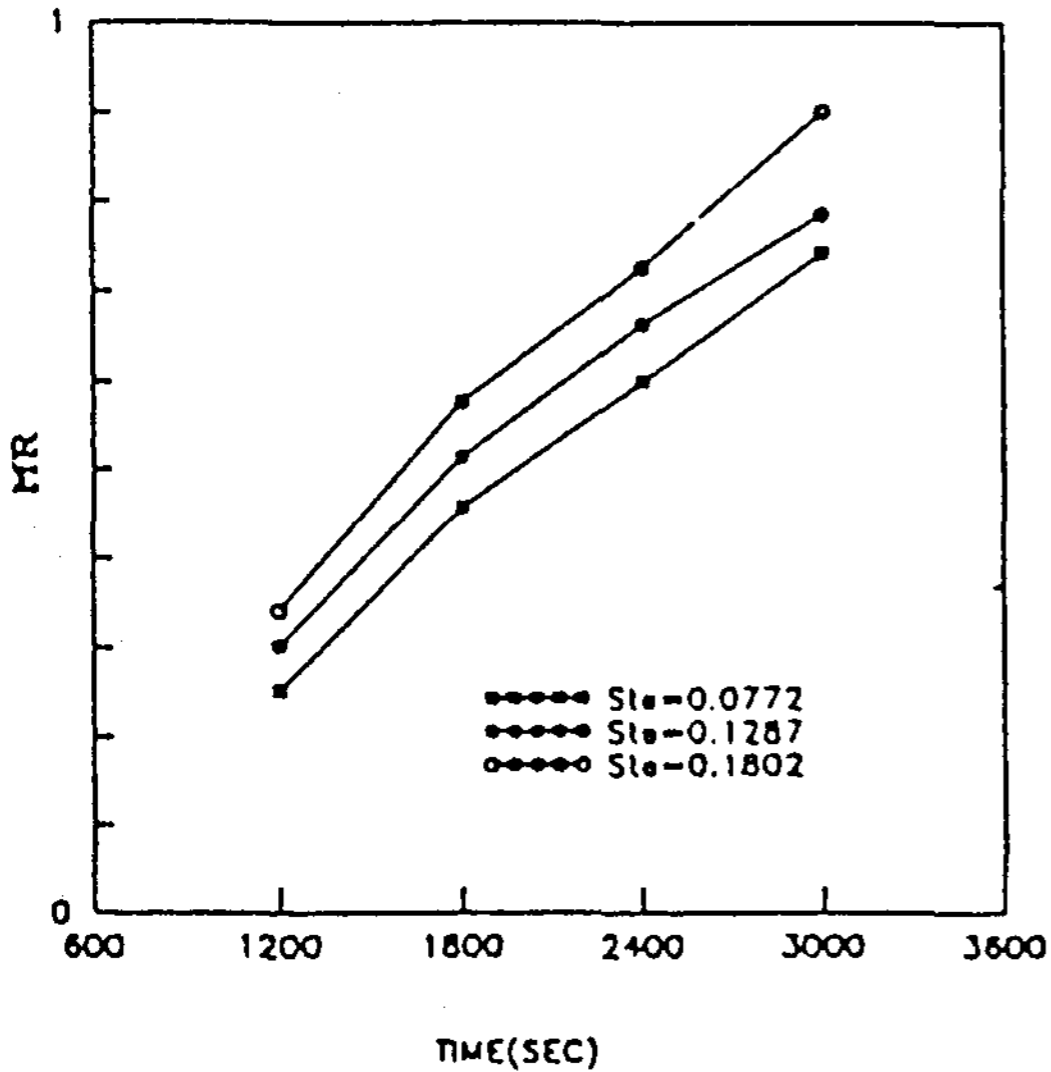


Fig. 11. Timewise variation of the melting rate for rectangular tube with $A=1.00$

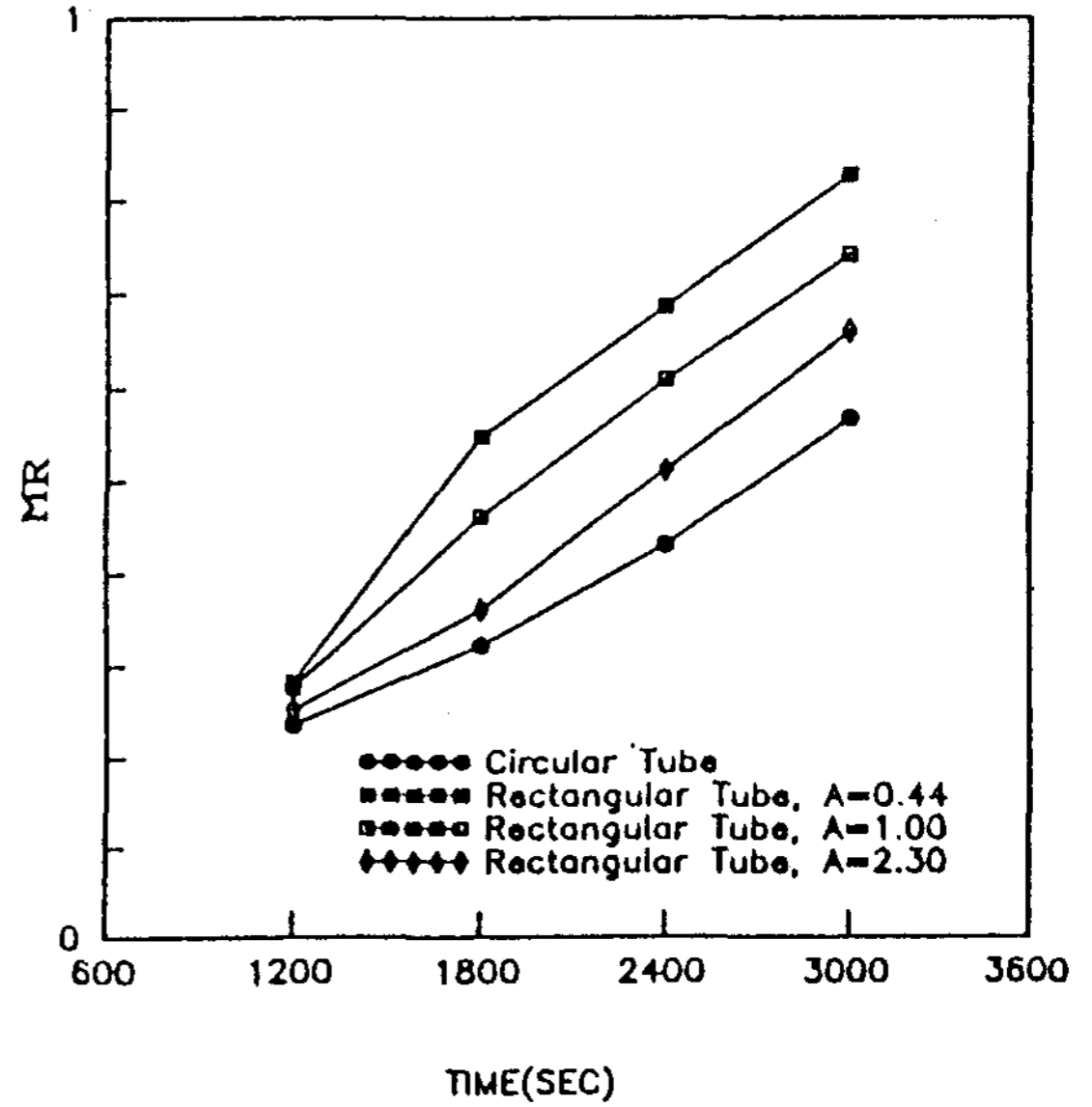


Fig. 13. Timewise variation of the melting rate for $Ste=0.0772$

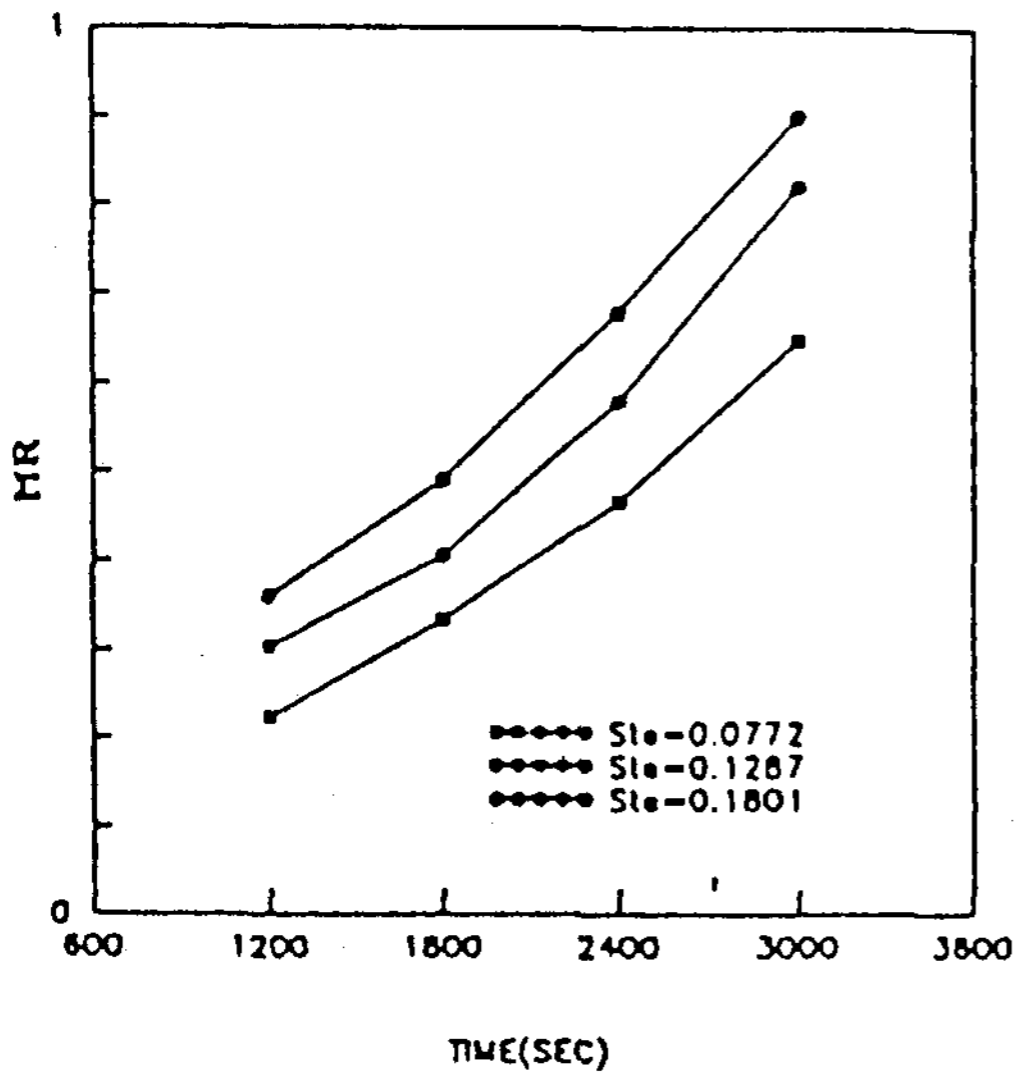


Fig. 12. Timewise variation of the melting rate for rectangular tube with $A=2.30$

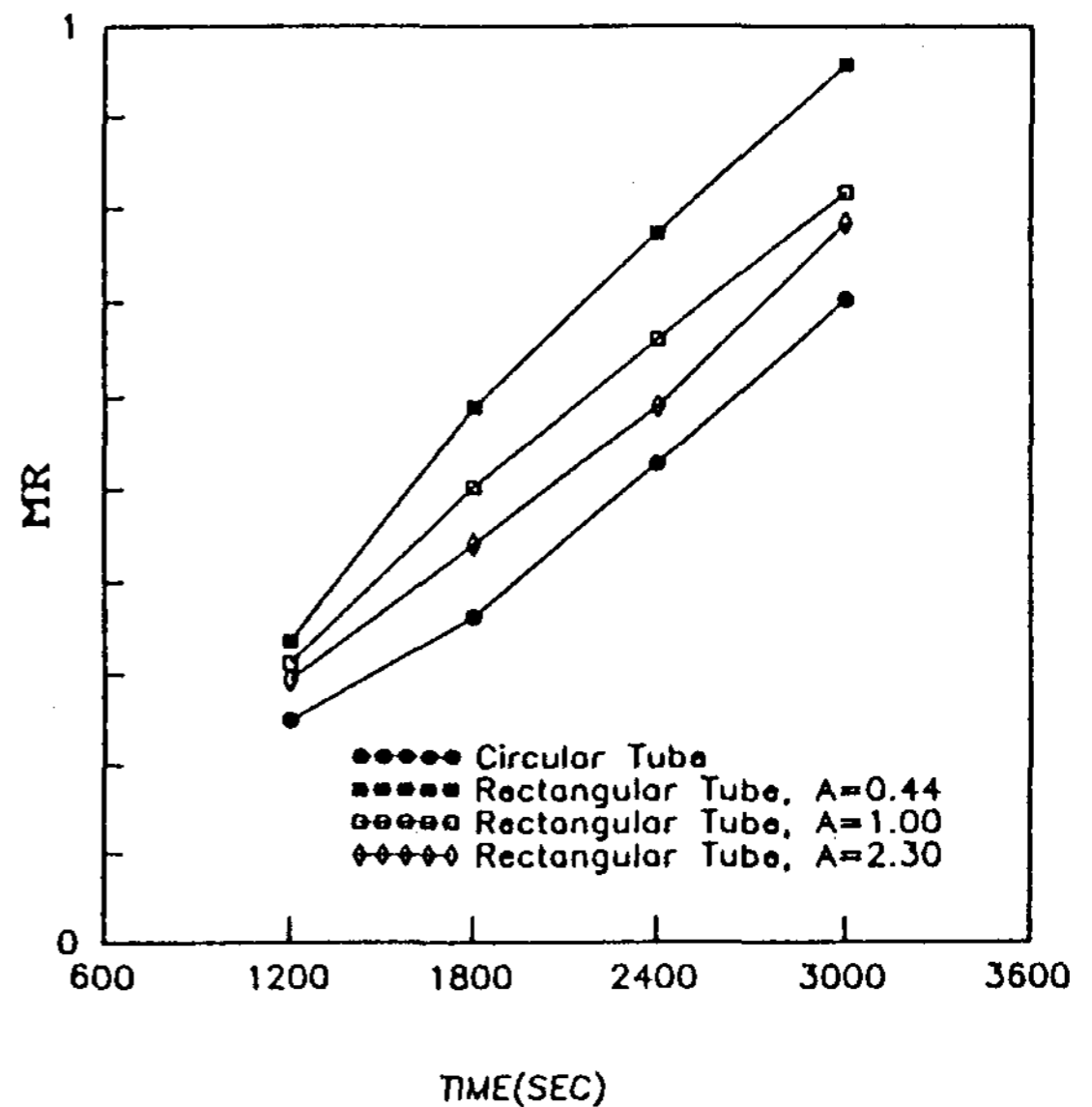


Fig. 14. Timewise variation of the melting rate for $Ste=0.1287$

원통캡슐의 순으로 나타났다. 이는 사각단면의 경우에 접촉용해와 더불어 측면에서 자연대류에 의한 용해가 같이 일어나기 때문이며, 원의 경우는 사각캡슐에서와는 달리 측면에서 자연대류가 없기 때문이라고 생각된다. Stefan수가 0.0772일 때, $A=0.44$ 인 사각캡슐의 용해율은 원

통캡슐에 비해 60% 정도 증가 하였고, Stefan수 0.1287일 때는 약 48%, Stefan수가 0.1802일 때는 약 48% 정도 증가 하였다. 축열조의 축열 및 방열 성능에서 볼 때 축열은 빠른 시간내에 완

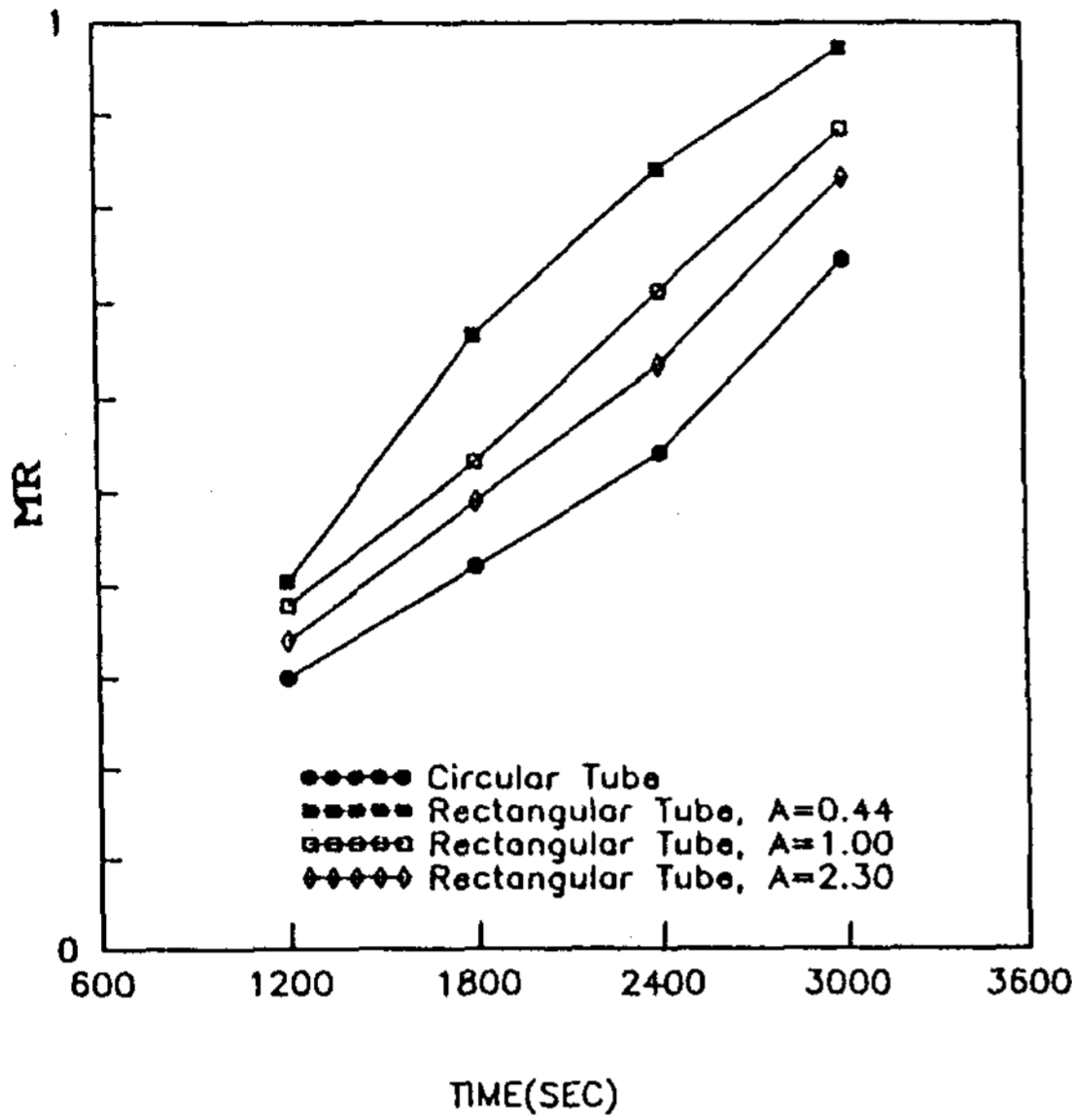


Fig. 15. Timewise variation of the melting rate for $Ste=0.1802$

료되는 것이 바람직하므로 본 실험의 결과로 볼 때 동일한 PCM 질량을 축열캡슐에 넣어서 용해시킬 때 종횡비가 가급적 작은 사각단면이 유리함을 알 수 있다.

3. 자연대류에 의한 영향

Fig.16에는 원통캡슐의 경우 상부에서 자연대류에 의한 용해량을 구하기 위하여 길이 2.5mm, 두께 0.2mm인 베이클라이트 핀을 삽입하여 촬영한 것이다. Fig.5에 나타난 결과와 비교해 보면 핀에 의한 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며, 만일 상부에서 용해가 전혀 일어나지 않고 단지 침강하면서 하부에서 접촉용해만 일어난다면 핀은 고상 PCM에 파묻힌 상태로 있으며, 액상으로 돌출되지 않을 것이다. 그러나 사진에서처럼 핀 끝이 액체층으로 노출된 것으로 보아 상부에서의 용해가 있음을 확인할 수 있다.

Fig.17는 Stefan수가 0.0772, 0.1287 및 0.1801일 때 전체용해량과 상부에서 자연대류에 의한 용해량을 나타낸 것이다. 전체용해량은 시간과 더불어 현저하게 증가하나, 자연대류에 의한 용해

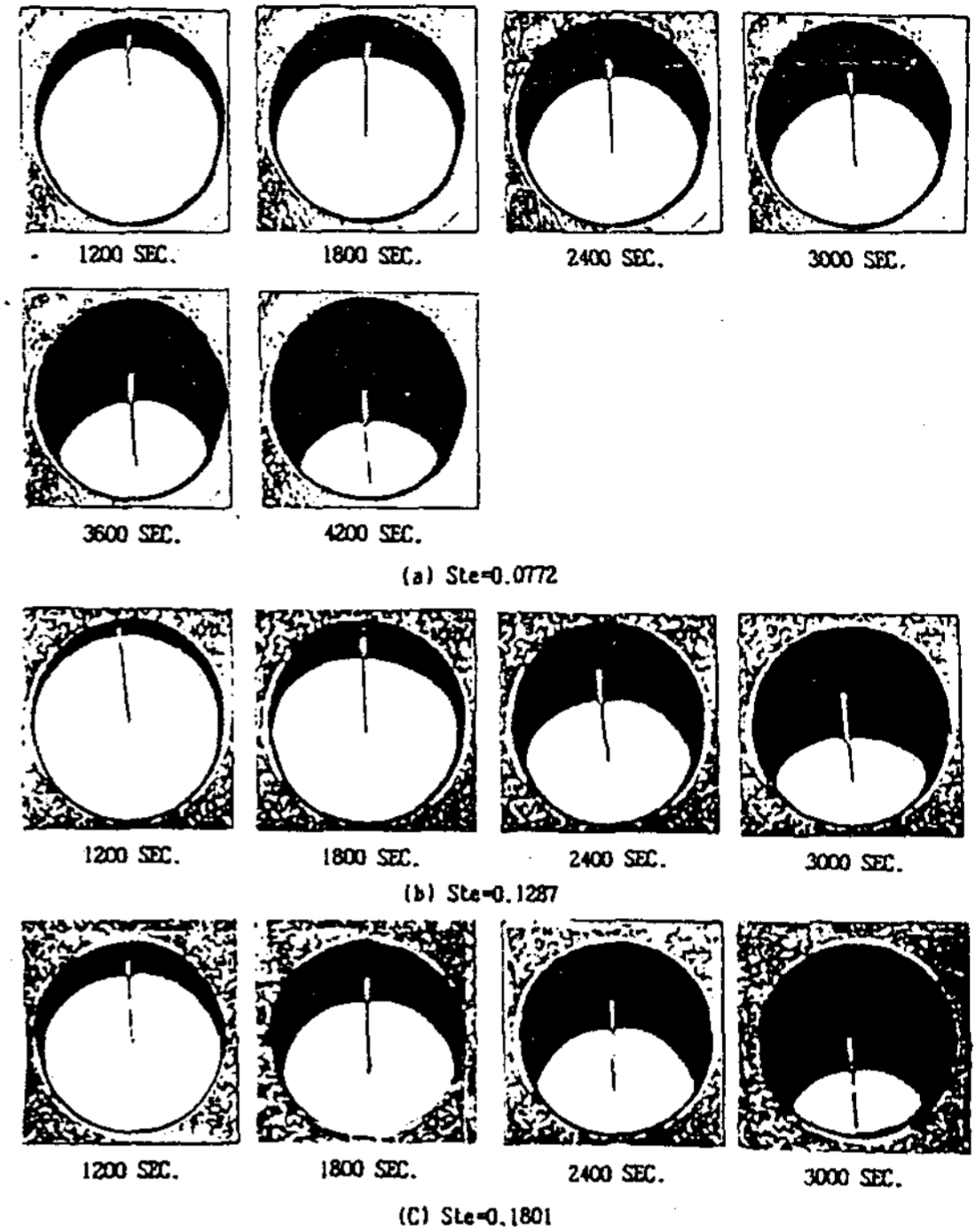


Fig. 16. Photographs of the melting of the solid PCM with inserted fin

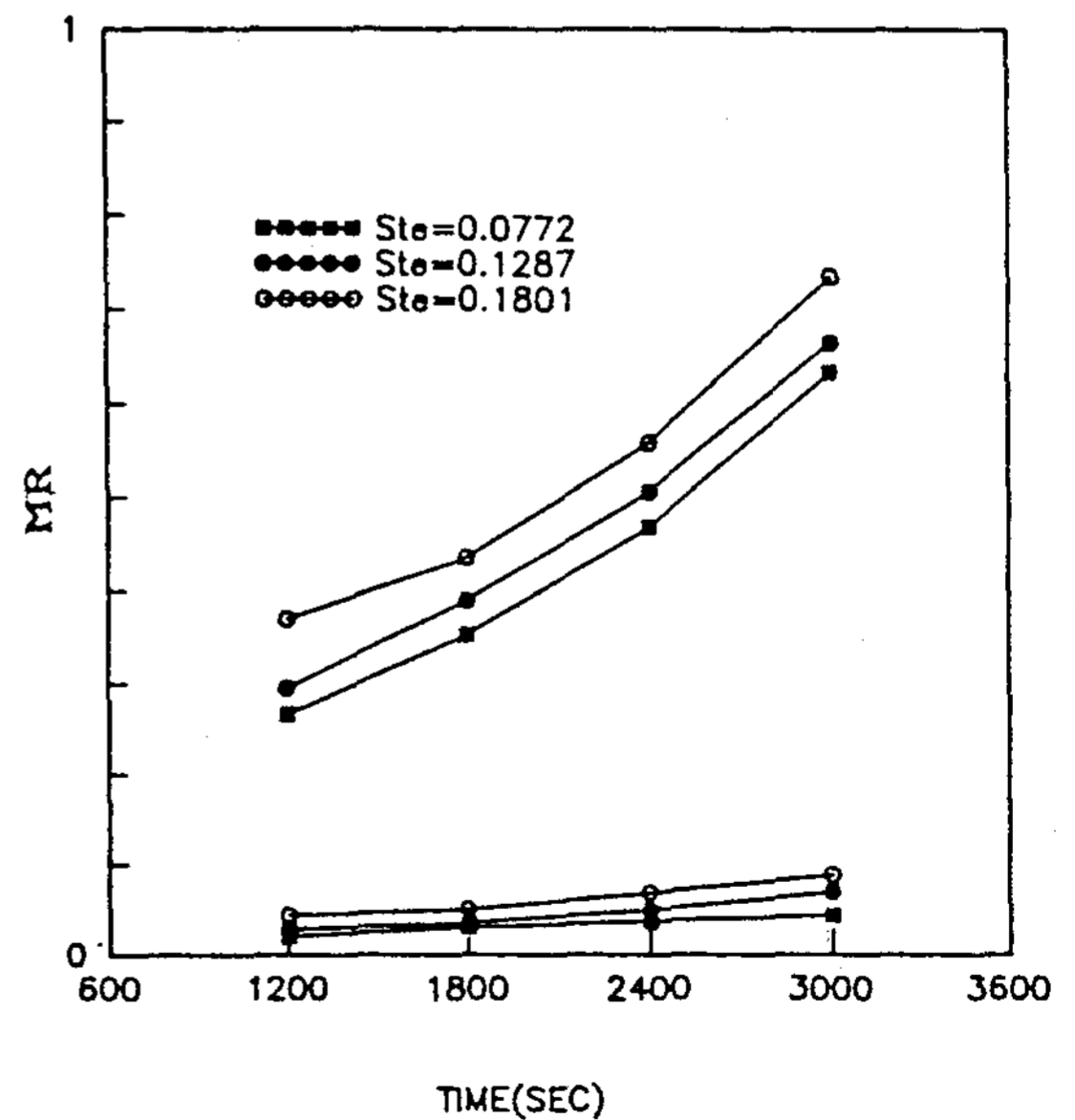


Fig. 17. The effect of natural convection on the melting rate for circular tube

량은 시간에 따라 다소 증가하는 것으로 나타났다. Stefan수가 0.0772일 때, 전체시간에 걸쳐서 자연대류의 기여도는 6.1%, Stefan수 0.1287일 때는 8.6%, Stefan수가 0.1802일 때는 약 11.2%이다.

IV. 결 론

원형 및 사각단면을 가지는 수평 캡슐에서 초기에 용점온도로 유지되는 상변화물질을 용해시킬 때 일어나는 접촉용해에 대한 실험적인 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 용해율은 Stefan 수 증가에 따라 증가하며, 원보다 사각형의 경우에 증가율이 크다.

2. 사각캡슐에서는 종횡비 A가 작을수록 용해율이 증가하였으며, 원통캡슐에서의 용해율은 A가 큰 사각캡슐 보다 작았다. Stefan 수 0.0772~0.1082의 범위에서 A=0.44인 사각캡슐의 용해율은 원통캡슐에 비해 52% 증가하였다. 따라서 축열조를 설계할 때 빠른 시간내에 축열을 하기 위해서는 종횡비가 작은 사각캡슐로 축열조를 구성하는 것이 바람직하다.

3. 원통캡슐의 경우에 자연대류의 기여도는 Stefan수 0.0772일 때 6.1%, Stefan수 0.1287일 때 8.6%, Stefan수 0.1082일 때 11.2%로 나타났다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 廣瀬宏一, “潛熱蓄熱に関する基礎的研究”, 日本東北大學 博士學位論文, 1984.
2. M. Bareiss and H. Beer, “An Analytical Solution of the Heat Transfer Process During Melting of an Unfixed Solid Phase Change Material Inside a Horizontal Tube”, International Journal of Heat Transfer, Vol.27, 1984, pp. 739~746.
3. M. K. Moallemi, B. W. Webb and R. Viskanta, “An Experimental and Analytical Study of Close-Contact Melting”, ASME J. of Heat Transfer, Vol.108, pp. 894~899.
4. 加藤 和三, 齊藤 武雄, “圓管カフセルの接觸融解の實驗的研究”, 日本傳熱シンポジウム, Vol. 1, 1990, pp.265~267.
5. 平田哲夫, 牧野善洋, 金子泰久, “水平におかれた潛熱蓄熱矩形容器内の融解特性”, 日本機械學會論文集, 1990, pp.277~284.
6. 홍 창 식, “파라핀을 채운 수평원관 내에서의 축열 및 방열특성에 관한 연구”, 서울대학교 박사학위논문, 1990.
7. 김 시 범, “금속스크랩이 혼합된 상변화물질의 축열특성”, 서울대학교 박사학위논문, 1984.

velocity and temperature distributions.

Mean Nusselt numbers are shown by $\bar{Nu} = C(Ra_L)^m$.

An Experimental Study on Close-Contact Melting in Horizontal Capsules with Circular or Rectangular Cross Sections

Si-pom, Kim* · Chi-woo, Lee**

* Dept. of Mechanical Eng., Dong-A Univ.*

** Test Lab., Daewoo Public Motors Co.

This empirical paper addresses the phenomena of the contact melting of PCM in horizontal capsules of circular and rectangular cross sections with various aspect ratio.

The melting-rate tends to increase as the Stefan number increases. The case of rectangular tube displays larger melting-rate than that of circular tube, and the melting-rate increases as the aspect ratio decreases for rectangular tubes. In case of circular tube, the effect of natural convection on the melting-rate is 6.1%, 8.6% and 11.2% according to Stefan number 0.0772, 0.1287 and 0.1802 respectively.

The Study of the Fabrication and Characteristics of n-CdS_{0.46}Se_{0.54}/p-Cu_{2-x}S_{0.46}Se_{0.54} heterojunction Solar Cells

Sang-Ha, You · Seung-Pyung, Choi · Sang-Youl, Lee · Kwang-Joon, Hong
Sang-Suhg, Suh · Hye-Suk, Kim, Seung-Yong, Jeon · Eun-Hee, Yun*
Jong-Dae, Moon** Yeong-Jin, Shin · Tae-Soo, Jeong · Hyun-Keel, Shin
Tack-Sung, Kim*** Kee-Soo, Rheu****

* Department of Physics, College of Natural Sciences, Chosun University

** Department of Physics, College of Natural Sciences, Dongshin University

*** Department of Physics, College of Natural Sciences, Jeonbuk National University

**** National Industrial Technology Institute of Jeonbuk

CdS_{0.46}Se_{0.54} single crystal was grown by a sublimation method.

The crystal structure and the temperature dependence of carrier density and mobility of CdS_{0.46}Se_{0.54} single crystal were studied.

Heterojunction solar cells of n-CdS_{0.46}Se_{0.54}/p-Cu_{2-x}S_{0.46}Se_{0.54} were fabricated by the substitution reaction.

The spectral response, the J-V characteristics and the conversion efficiency of the n-CdS_{0.46}Se_{0.54}/p-