

JAERI-M

88-183

ヒートパイプの過渡応答特性

1988年10月

露崎 典平・斎藤 隆・石上 信哉*・河田 通敬*
紺野 真信*・神永 文人*・岡本 芳三*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 いばらき印刷株

ヒートパイプの過渡応答特性

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉設計室

露崎典平・斎藤 隆⁺・石上信哉^{*}・河田通敬^{*}

紺野真信^{*}・神永文人^{*}・岡本芳三^{*}

(1988年9月2日受理)

一般に、原子炉プラントなどにヒートパイプを使用した場合、通常運転時の特性のみならず、事故時の過渡応答特性を求める必要がある。しかしながら、ヒートパイプの加熱部の温度及び熱負荷が急変した場合のヒートパイプの過渡応答特性については、ほとんど研究がなされていないのが現状である。

本研究は、原子炉中性子照射装置用の冷却に用いる重力型水ヒートパイプ及びVCHPヒートパイプについて、加熱部の熱負荷が突変した場合におけるヒートパイプの過渡応答特性を調べるために実施したものである。実験の結果、最適な作動状態では2~3秒で応答することが明らかになった。

大洗研究所：〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町字新堀3607

+ 材料試験炉部

* 茨城大学

Transient Characteristics of Heat Pipes

Noriyoshi TSUYUZAKI, Takashi SAITO⁺, Shinya ISHIGAMI*
Michitaka KAWADA*, Masanobu KONNO*, Fumito KAMINAGA*
and Yoshizo OKAMOTO*

HTTR Designing Laboratory
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received September 2, 1988)

When the heat pipe is used in a nuclear engineering field, it is indispensable to understand transient characteristics as well as in a steady state at a normal operation. However there have been few informations about the transient characteristics of a heat pipe in case of rapid temperature or heat load change in an evaporator section.

The purpose of this study is to examine transient characteristics of a gravity assisted heat pipe and variable conductance heat pipe (VCHP) which will be used in a neutron irradiation capsule. The response time of the heat pipe was a few seconds under the operation temperature of evaporator part.

Keywords: Transient Characteristics, Gravity Assisted Heat Pipe,
Variable Conductance heat Pipe (VCHP), Japan Materials
Testing Reactor

+ Department of JMTR Project

* Ibaraki University

目 次

1. 序 論	1
1.1 作動の原理及びその特性	1
1.2 ヒートパイプの利用状況	1
1.3 ヒートパイプの原子力への利用	2
2. ウイック式ヒートパイプによる過渡応答に関する実験	3
2.1 目 的	3
2.2 実験装置	3
2.3 実験方法	3
2.4 実験結果及び考察	3
2.5 まとめ	4
3. 熱サイフォン式ヒートパイプ及び VCHP による過渡応答に関する実験	20
3.1 目 的	20
3.2 実験装置	20
3.3 実験方法	20
3.4 実験結果及び考察	21
3.5 まとめ	22
4. 結 論	117
謝 辞	118
参考文献	118

Contents

1. Introduction	1
1.1 Theory of working and characteristic for heat-pipe	1
1.2 Situation of utilization for heat-pipe	1
1.3 Utilization of heat-pipe to atomic power	2
2. Transient experiment using a wick heat-pipe	3
2.1 Objects	3
2.2 Experimental apparatus	3
2.3 Experimental procedure	3
2.4 Results and discussions	3
2.5 Conclusions	4
3. Transient experiments using a gravity assisted heat-pipe and VCHP (Variable Conductance Heat-Pipe)	20
3.1 Objects	20
3.2 Experimental apparatus	20
3.3 Experimental procedure	20
3.4 Results and discussions	21
3.5 Conclusions	22
4. Conclusions	117
Acknowledgement	118
References	118

List of Tables

- Table 1.1 Power density and coefficient of nuclear reactor
Table 2.1 Experimental conditions for wick heat-pipe test runs
Table 3.1 Experimental conditions for gravity assisted heat-pipe
test runs
Table 3.2 Effect of coolant flow rate from experiment of gravity
assisted heat pipe
Table 3.3 Experimental conditions for variable conductance heat-
pipe test runs

List of Figures

- Fig. 2.1 Test section for wick heat-pipe tests
- Fig. 2.2 Experimental apparatus for wick heat-pipe tests
- Fig. 2.3(1) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 0.29 l/min)
- Fig. 2.3(2) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 5.40 l/min)
- Fig. 2.3(3) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 1.40 l/min)
- Fig. 2.3(4) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 0.25 l/min)
- Fig. 2.3(5) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 0.60 l/min)
- Fig. 2.3(6) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 2.20 l/min)
- Fig. 2.3(7) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 19°C
and Coolant flow rate = 1.40 l/min)
- Fig. 2.3(8) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 19°C
and Coolant flow rate = 2.00 l/min)
- Fig. 2.3(9) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 19°C
and Coolant flow rate = 3.00 l/min)
- Fig. 2.3(10) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 19°C
and Coolant flow rate = 4.00 l/min)
- Fig. 2.3(11) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 19°C
and Coolant flow rate = 0.55 l/min)

- Fig. 3.1 Test section for gravity assisted and variable conductance heat-pipe tests
- Fig. 3.2 Experimental apparatus for gravity assisted and variable conductance heat-pipe tests
- Fig. 3.3 Experimental procedure for gravity assisted and variable conductance heat-pipe tests
- Fig. 3.4(1) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(2) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(3) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(4) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(5) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(6) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(7) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(8) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(9) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(10) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(11) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

- Fig. 3.4(12) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(13) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(14) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(15) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(16) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(17) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(18) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(19) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(20) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(21) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(22) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(23) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(24) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

- Fig. 3.4(25) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(26) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(27) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(28) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(29) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(30) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(31) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(32) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(33) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(34) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(35) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(36) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(37) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

- Fig. 3.4(38) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(39) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(40) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(41) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(42) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(43) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(44) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(45) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(46) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(47) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(48) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(49) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(50) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

- Fig. 3.4(51) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(52) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(53) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(54) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(55) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(56) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(57) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.4(58) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(59) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(60) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(61) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(62) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.4(63) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

- Fig. 3.4(64) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(65) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(66) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.4(67) Effect of coolant flow rate for water bath temperature
(95°C)
- Fig. 3.4(68) Effect of coolant flow rate for water bath temperature
(85°C)
- Fig. 3.4(69) Effect of coolant flow rate for water bath temperature
(65°C)
- Fig. 3.4(70) Effect of water bath temperature
- Fig. 3.4(71) Initiation time for boiling and period
- Fig. 3.5(1) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.5(2) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.5(3) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.5(4) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.5(5) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.5(6) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)
- Fig. 3.5(7) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

- Fig. 3.5(8) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.5(9) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)
- Fig. 3.5(10) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.5(11) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.5(12) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.5(13) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.5(14) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)
- Fig. 3.5(15) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

List of Photographs

Photo. 2.1 Wick heat-pipe

Photo. 3.1 Gravity assisted heat-pipe and variable conductance heat-pipe

1. 序 論

1.1 作動の原理及びその特性

ヒートパイプとは、密閉した管内に作動流体と呼ばれる気相と液相に相互に変化しやすい媒体を封入し、その相変化の潜熱を仲介にして、作動流体によって熱を輸送する装置である。

ヒートパイプは通常、蒸発部、断熱部及び凝縮部から構成される。蒸発部は容器外の熱源からの熱エネルギーを容器内の作動流体に与え、これを蒸発させる部分である。断熱部は、熱源と吸熱源が離れている場合に存在し、蒸発した作動流体の移動通路を構成し、外周との熱の出入りを遮断するように工夫された部分である。凝縮部は断熱部の蒸気通路中を移動してきた作動流体としての蒸気を凝縮し、熱エネルギーを容器外の吸熱源に放出させる部分である。この凝縮部において凝縮した作動流体は、重力による自然落下や、通常、多孔性物質よりなるウイックの毛細管圧力等を利用して、断熱部を通って蒸発部へ還流される。

蒸発及び凝縮の潜熱を利用するヒートパイプによる熱輸送は、通常の熱伝導や顯熱の形で行う対流による熱輸送に比べて、同一の温度差に対し大きな熱量を輸送しうる。このため、ヒートパイプは、小型軽量の構造で大量の熱量を輸送する有益な手段の一つであると言うことができる。また、内部の流体の循環に対しては何らの外部動力を必要としないので、長期間にわたって高い信頼性を持つこともできる。これらのため、近年では、広い分野で熱除去や温度の均一化等を目的として、各種のヒートパイプが使用されている。

1.2 ヒートパイプの利用状況

ヒートパイプの利用例としては、宇宙機器、太陽熱利用、排熱回収、電子、音響、電気機器等があげられる。

宇宙機器の利用に関しては、熱量輸送、温度均一化、また温度制御素子などとして利用されている。熱量輸送素子としては、米国の軌道天文衛星 OAO-C の電子機器の冷却系等で利用されており、この装置では、熱入力35Wのとき電子機器の温度を60°Cから22°Cに下げるに成功している。温度均一化素子としては、米国の応用技術衛星 ATS-E 等において利用されている。この衛星は、重力傾度姿勢制御方式を用いておりスピンをしないため、太陽直射側が高温に、反対側が低温となる。このため、ヒートパイプを用いることにより周方向の最大温度勾配を 145°C から 17°C に減少させている。温度制御素子としては、NASA のスペースシャトルにおける実験機器の温度制御をするサーマルキャニスターで利用されている。このキャニスターには各側壁内面の縦方向に 4 本、横方向に 3 本のヒートパイプが使用されており、これにより、パネルの端から端までの温度差を最悪の場合でも 4 °C 内におさめることが可能となっている。

太陽熱への利用に関しては、太陽熱エネルギーによる発電や、建物の冷暖房等がある。これらは、太陽エネルギーを集熱する集熱器の部分にヒートパイプを適用し、太陽エネルギーの吸収、交換を極めて効率よく行って集熱交換器に送るというものである。Dynatherm 社で進められた開発計

画では直径 9 cm, 長さ 12 m のヒートパイプにより 300 °C の温度で 18 kW の集熱量を見込んでいる。

排熱回収への利用に関しては、排熱回収装置や空調用排熱回収装置がある。これらは、熱交換器にヒートパイプを利用したものであり、次のような利点がある。

- (1) 高温側から低温側への単位管断面当たりの輸送熱量を大きくとることができるので、コンパクトとすることができます。
- (2) 給排気管の低温度差における排熱回収が可能である。
- (3) 構造上、熱交換器を向流型とすることが容易であるので、排熱回収効率を大きくとることができます。
- (4) 給気側と排気側が仕切板によって完全にシールされているので、汚染した排気ガスが給気ガスと混合することはない。したがって、臭気や汚染が問題となる工場、学校、病院などの排熱回収に適している。
- (5) ヒートパイプの受動系の伝熱素子としての性格から、運転のための動力を必要としないため、運転費は不要であり、回収した熱量を、正味のエネルギーとすることができる。

電子への利用に関しては、IC のチップの接合温度を下げるここと、IC 回路相互の接合部間の温度差をなくすこと、音響機器への利用に関しては、パワーアンプの終段、パルス電源およびスピーカのボイスコイルからの発生熱を放出すること、また、電気機器への利用に関しては、メタルクラッド開閉装置や直流サーボモータの発生熱を放出することなどがあげられる。

1.3 ヒートパイプの原子力への利用

ヒートパイプによる一般の原子力機器への応用は、数多くある。例えば、原子炉への直接利用、補助的核熱利用、放射性物質輸送の際の除熱、使用済み燃料貯蔵設備での除熱、放射性廃棄物の地下貯蔵タンクでの除熱、緊急時における炉心冷却、核融合炉でのブランケット冷却等である。これらは、イタリアの Ispra (Joint Nuclear Research Center)、西ドイツの Stuttgart の原子力研究所 IKE、及びフランスの Grenoble の核研究所で研究され、一部は実用とまでなっている。一方、日本においても、ヒートパイプを使用し、照射キャップセルの中央に挿入された試料から積極的な除熱を行う研究がされている。

実際にヒートパイプを原子炉内で利用した場合、ヒートパイプは Table 1.1 に示すような条件下にさらされることになる。このためこの過渡変化に対するヒートパイプの応答は、原子炉の安全運転上重要となる。しかしながら、このように速い過渡応答に関する研究はほとんど行われていないのが現状である。

Table 1.1 Power of density and Coefficient of nuclear reactor

原子炉での定常出力	軽水炉	~ 43 W/cm ²
	液体金属冷却型高速炉	~ 120 W/cm ²
出力変化条件	出力変化	~ 100 %/sec
	温度変化	~ 50 °C/sec
	圧力変化	~ 10 bar/sec

2. ウイック式ヒートパイプによる過渡応答に関する実験

2.1 目的

本実験は、ウイック式ヒートパイプの過渡応答特性を調べるために行ったものである。ヒートパイプの蒸発部への熱負荷の急変は、ヒートパイプを温水に浸漬する方法を用いた。測定はヒートパイプ壁面の温度変化を調べた。さらに、凝縮部への冷却水量を変化させ、ヒートパイプ壁面の温度変化を調べた。

2.2 実験装置

実験装置は Fig. 2.1 に示すように上部を冷却、下部を加熱し、その中間部は発泡プラスチック材で断熱した。

凝縮部の冷却方法は、水冷方式を採用し、水道水を直接用いた。一方、蒸発部の加熱は、この部分の熱負荷を急変できるように、実験開始と同時に蒸発部を温水に浸漬し加熱する方法を採用了。(Fig. 2.2 参照)

実験に使用したヒートパイプは、直径 4 φ、長さ 330 mm のウイック式ヒートパイプで、材質は銅製であり、作動流体は水である。Photo 2.1 に外観を示す。Fig. 2.1 に熱電対の取付け位置を示す。同図に示すようにヒートパイプ壁面の 0 ~ 5 の位置に、直径 0.1 mm の銅・コンスタンタン(CC) 热電対をステンレスハンダで取り付けた。また、断熱部の長さを変えた場合の実験も実施した(Fig. 2.1 参照)。ヒートパイプ B の場合、凝縮部の No. 0 ~ 2 の位置、蒸発部の No. 3 ~ 5 の位置で壁面温度を測定し、ヒートパイプ A の場合、凝縮部の No. 0 ~ 2 の位置、断熱部の No. 3 の位置、蒸発部の No. 4, 5 の位置で壁面温度を測定した。計測装置にはサーモダック(多点式温度計測器)を使用し、各点の温度を記録した。

2.3 実験方法

加熱温水は、絶えず沸騰状態にして温度を一定に保ち実験を行った。ヒートパイプは空气中に放置しておき、測定開始と同時に、沸騰している 100°C の温水の中に蒸発部を瞬時に浸漬し、ヒートパイプの壁面の温度変化を測定した。すなわち、ヒートパイプへの熱負荷を急変させたとき、ヒートパイプの壁面温度がどのように変化するかを実験した。さらに冷却水量を幾通りか変え、実験を行った。

2.4 実験結果及び考察

過渡応答の特性を調べる実験は加熱温水を用いて行った。実験条件を、Table 2.1 に、過渡時

の温度変化を Fig. 2.3 (1)から Fig. 2.3 (II)に示す。同図は縦軸が温度(°C), 横軸が時間(sec)である。

Bヒートパイプの実験結果から、実験開始後40秒までのデータをそれぞれ比較すると、冷却水量が減少するに伴い、凝縮部の温度が高くなるとともに、ヒートパイプの軸方向の温度勾配も大きくなっている。

Aヒートパイプ実験の場合、Bヒートパイプによる実験の時ほど、冷却水量による影響はない。

また、本実験では参考のため断熱部両端の壁面温度より熱伝導率を求めてみた。その結果、このウイック式ヒートパイプは銅の熱伝導率($380 \text{ kcal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$)より約20倍ほどの $7720 \text{ kcal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$ という結果が得られた。

2.5 まとめ

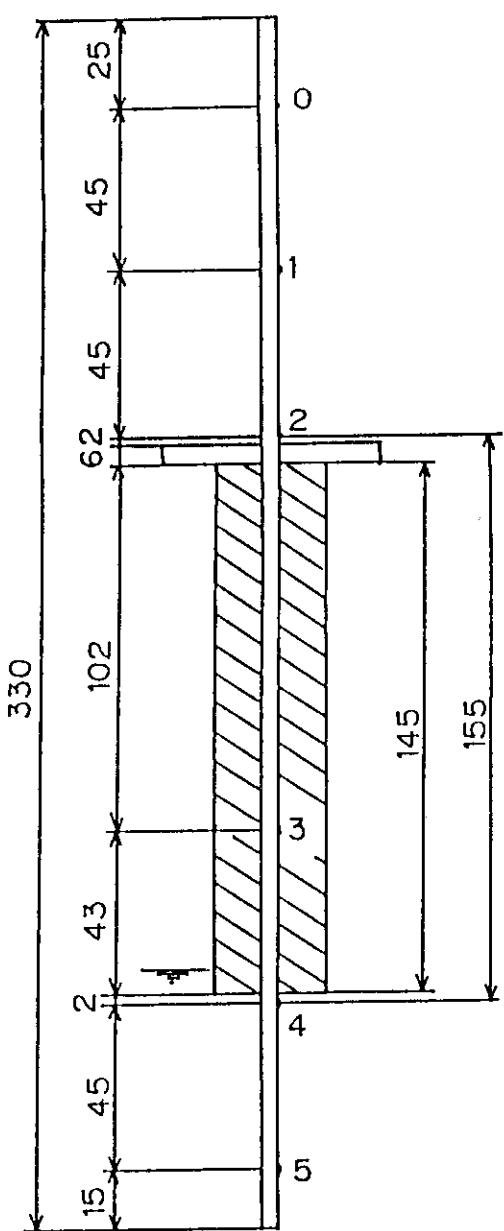
直径4φ、長さ330mmのウイック式ヒートパイプを用いた過渡応答特性を求める実験から以下に示す結果が得られた。

- (1) 壁面温度の過渡応答に関する応答時間は、加熱部で約4秒、断熱部で約15秒、冷却部では約18秒である。
- (2) 実験データより熱伝導率を求める最大値は $7720 \text{ kcal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$ 、また、温度伝導率の最大値は $8.7 \text{ m}^2/\text{h}$ となり、銅の約20倍の値である。
- (3) 凝縮部の温度は、冷却水量の減少に伴い上昇する。
- (4) 加熱部の温度は、冷却水量には依存しない。

Table 2.1 Experimental conditions for wick heat-pipe test runs

Run Number	Figure Number	Coolant flow Rate (l/min)	Coolant Temp. (°C)	Water Bath Temp. (°C)	Type of Heat Pipe
D1013HP	Fig.2.3(1)	0.29	20	100	B
D1014HP	Fig.2.3(2)	5.40	20	100	B
D1015HP	Fig.2.3(3)	1.40	20	100	B
D1016HP	Fig.2.3(4)	0.25	20	100	B
D1017HP	Fig.2.3(5)	0.60	20	100	B
D1018HP	Fig.2.3(6)	2.20	20	100	B
D1019HP	Fig.2.3(7)	1.40	19	100	A
D1020HP	Fig.2.3(8)	2.00	19	100	A
D1022HP	Fig.2.3(9)	3.00	19	100	A
D1023HP	Fig.2.3(10)	4.00	19	100	A
D1024HP	Fig.2.3(11)	0.55	19	100	A

< HEAT PIPE A >



< HEAT PIPE B >

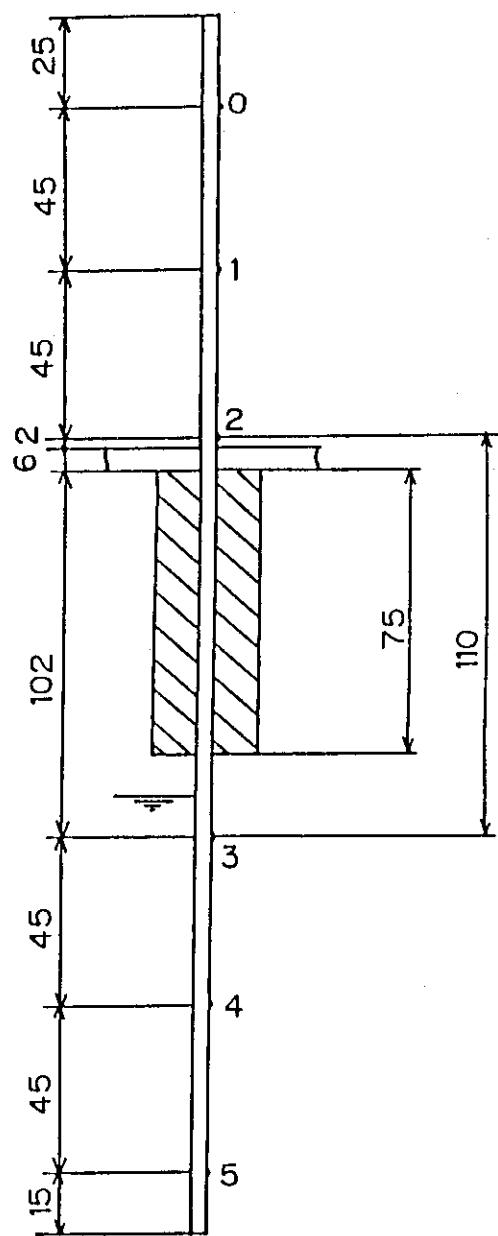


Fig. 2.1

Test section for wick heat-pipe tests

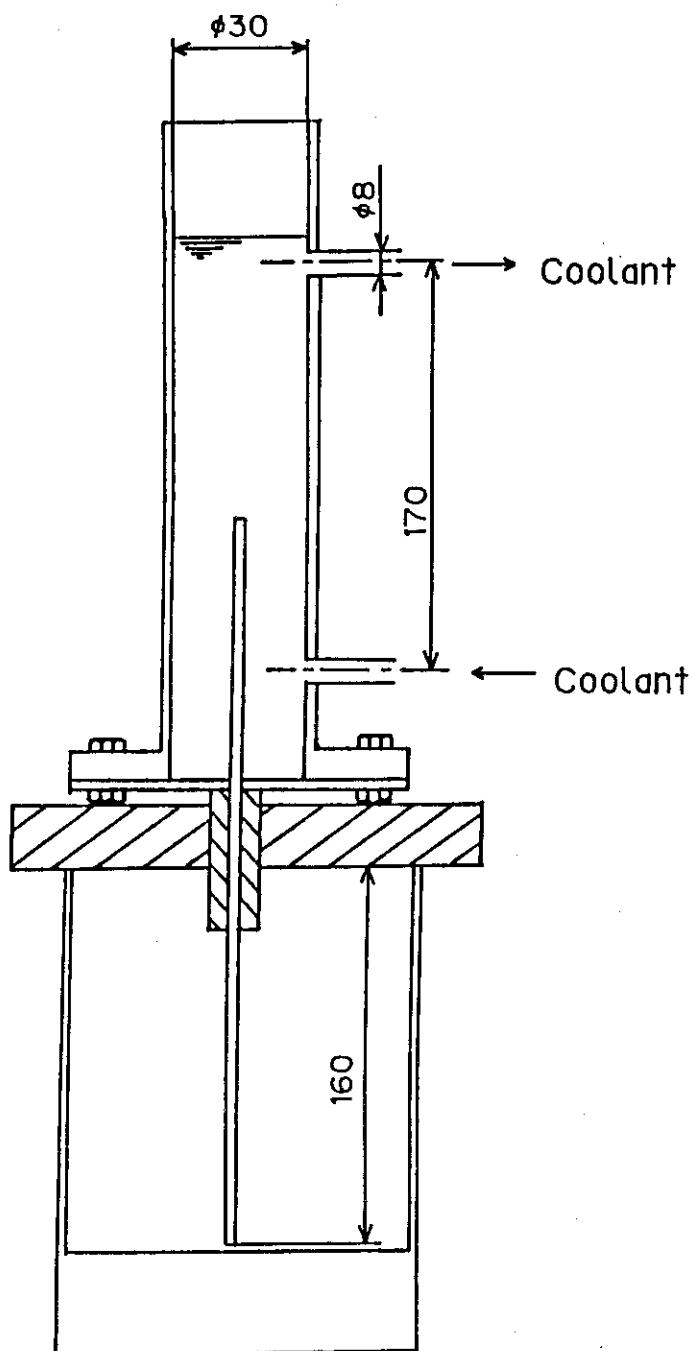


Fig. 2.2 Experimental apparatus for wick heat-pipe tests

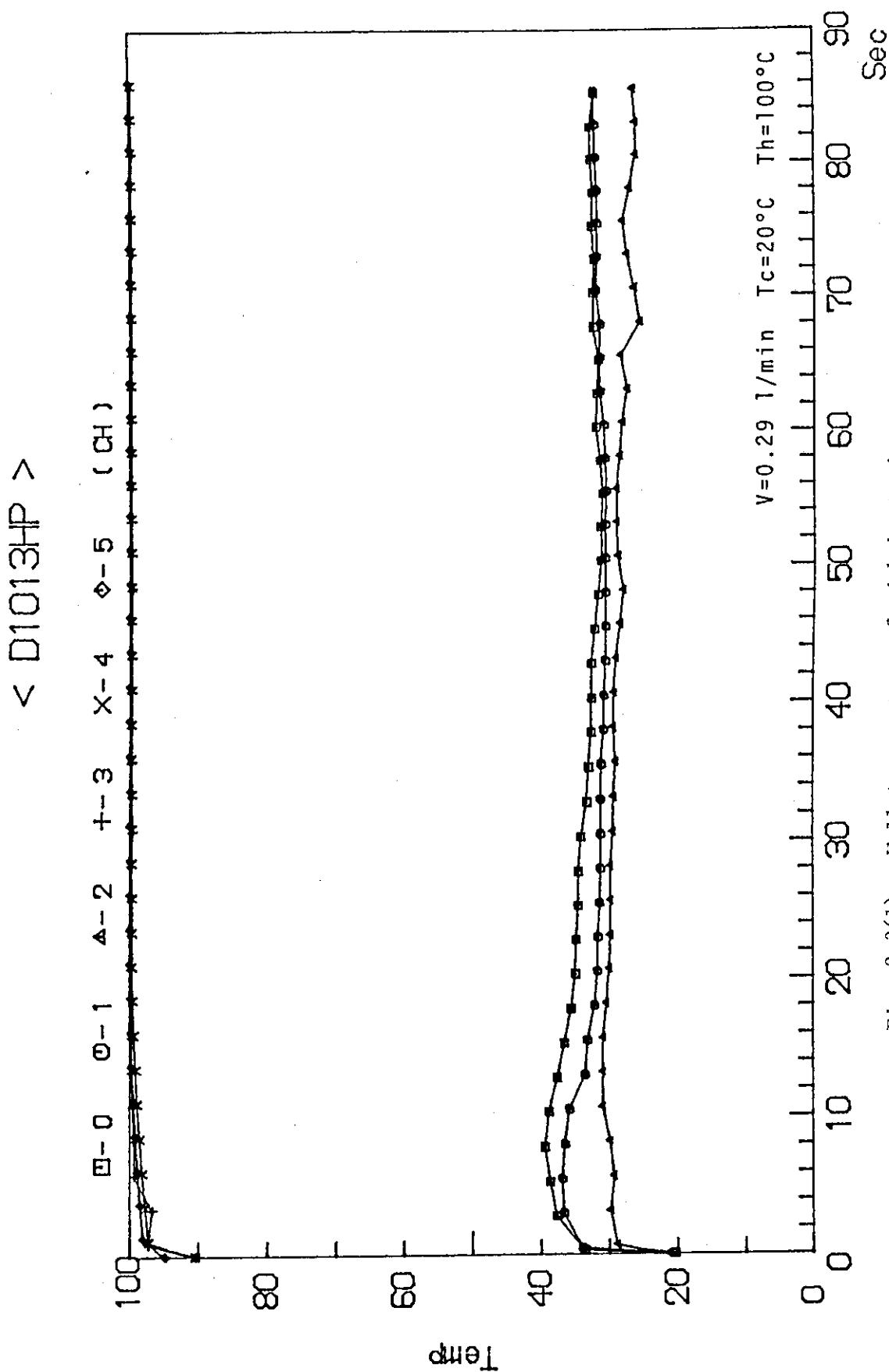


Fig. 2.3(1) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 0.29 l/min)

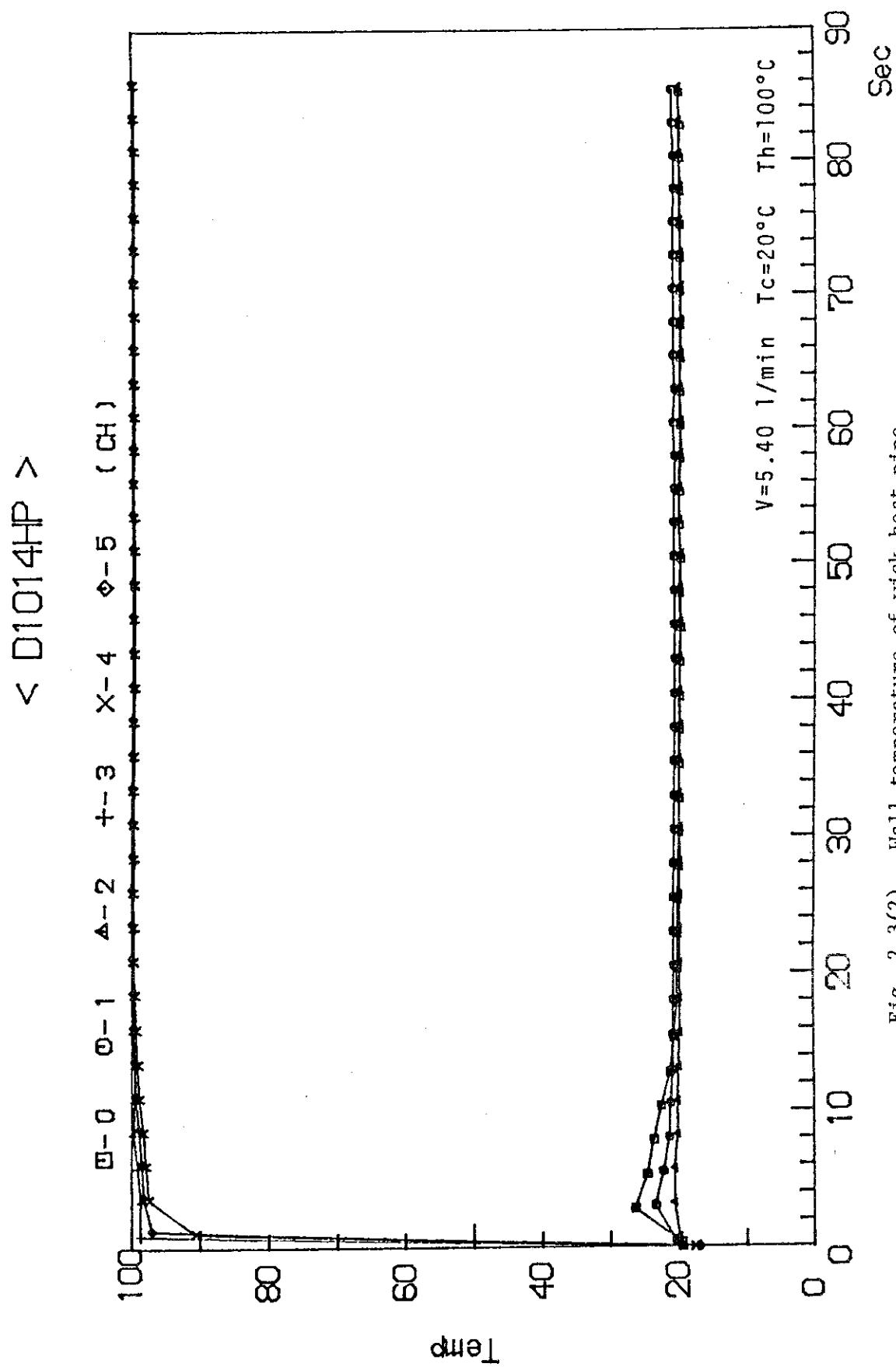
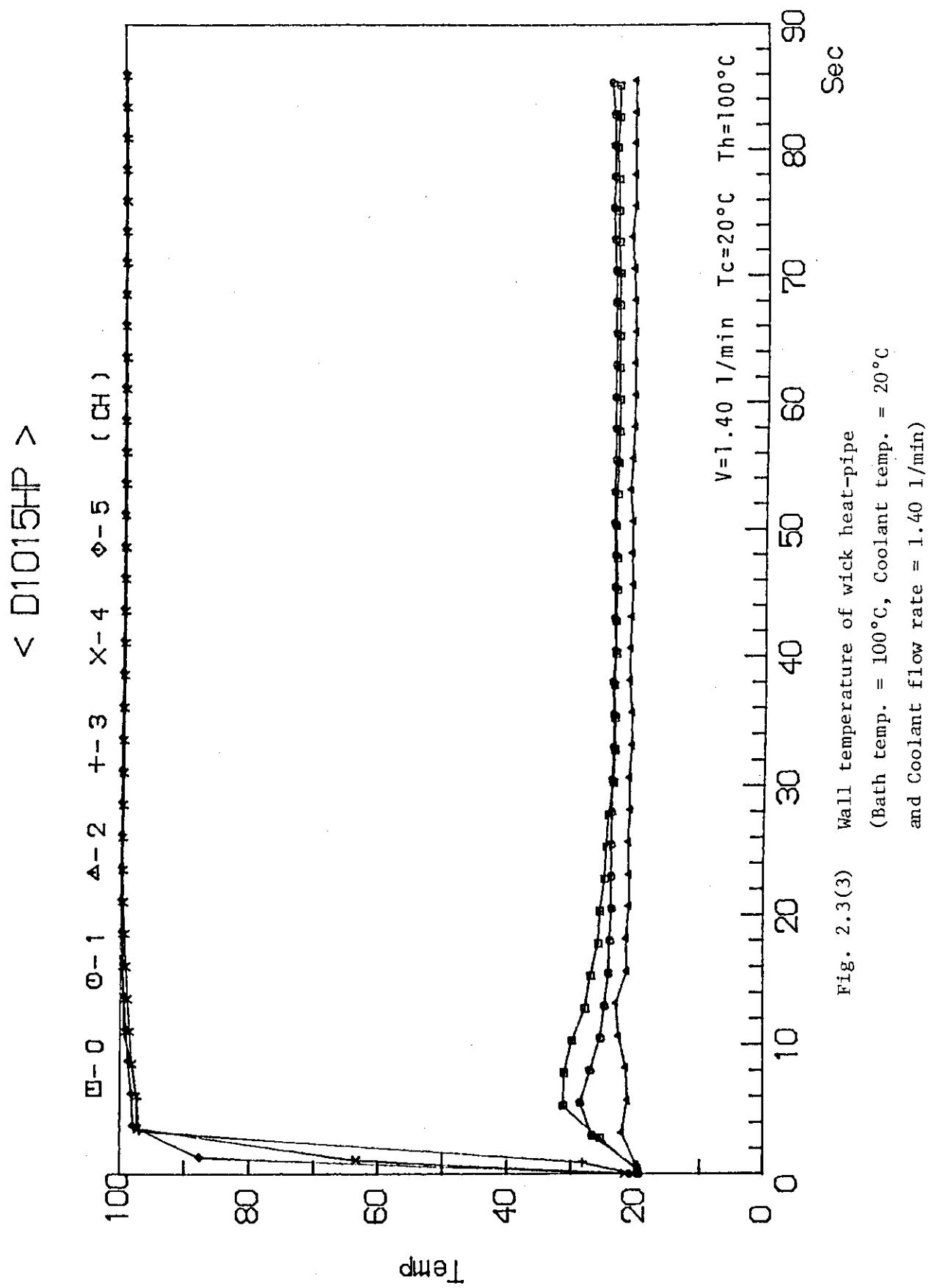


Fig. 2.3(2) Wall temperature of wick heat-pipe
 (Bath temp. = 100°C , Coolant temp. = 20°C
 and Coolant flow rate = 5.40 l/min)



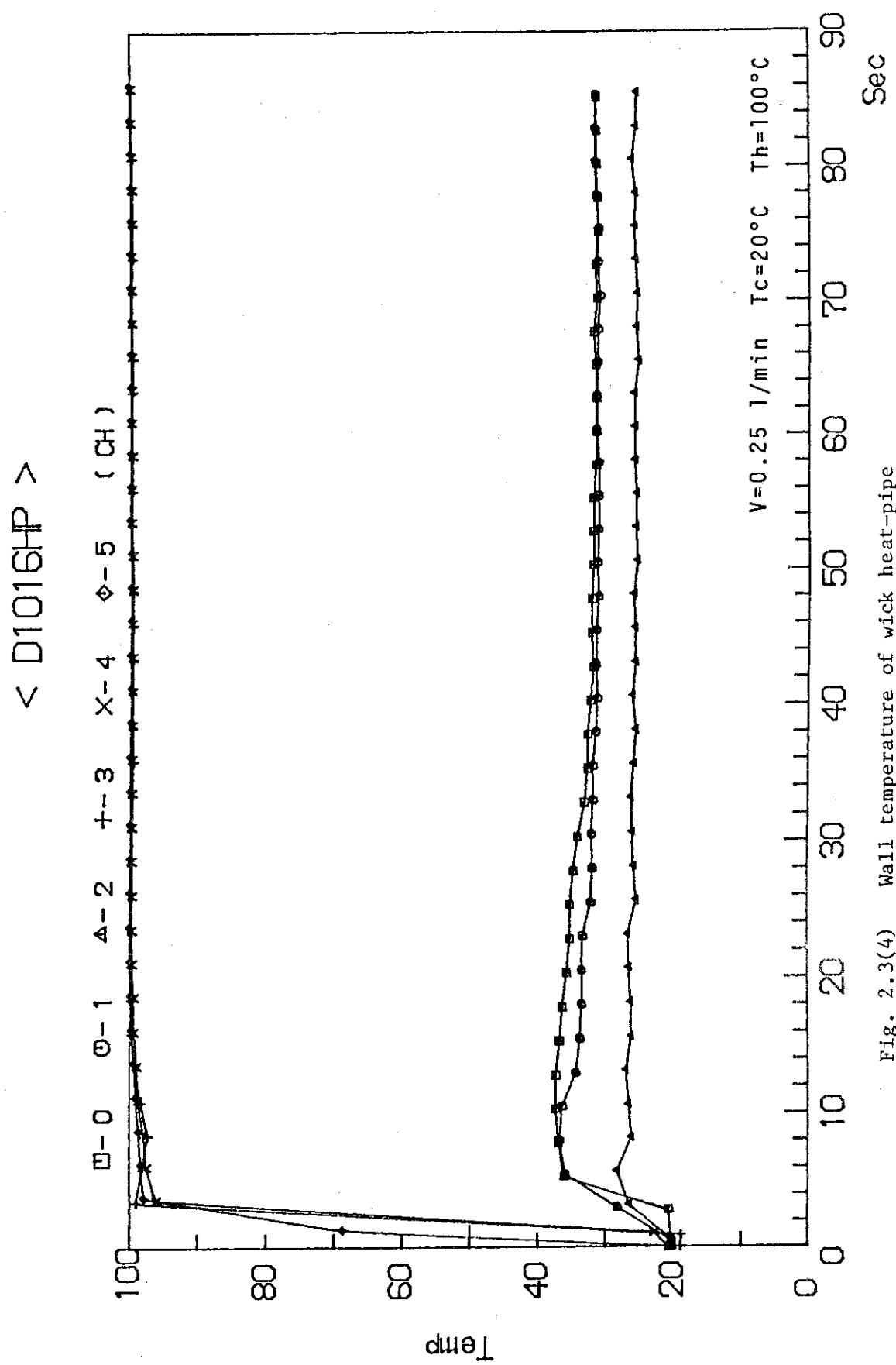


Fig. 2.3(4) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 0.25 l/min)

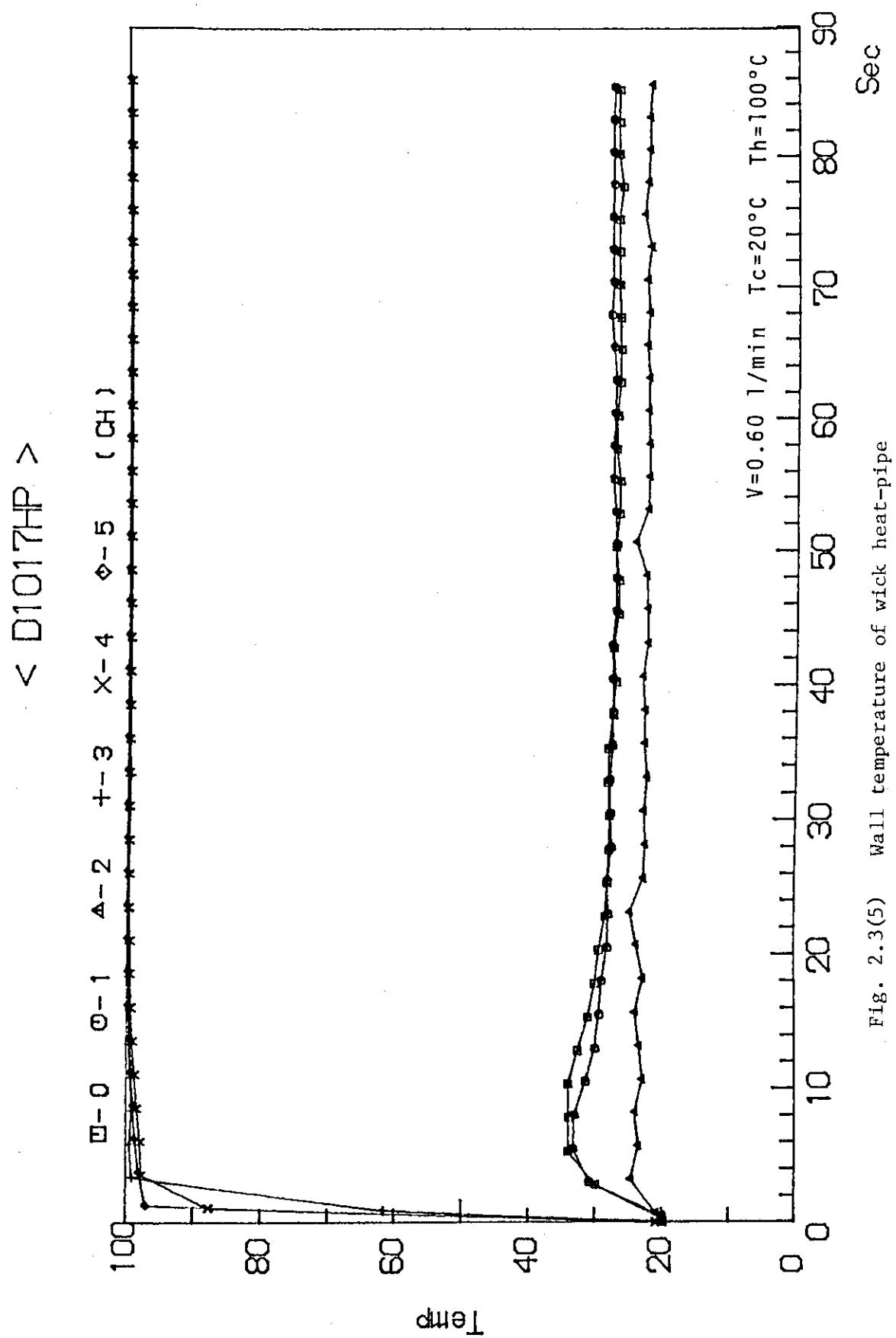


Fig. 2.3(5) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C , Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 0.60 l/min)

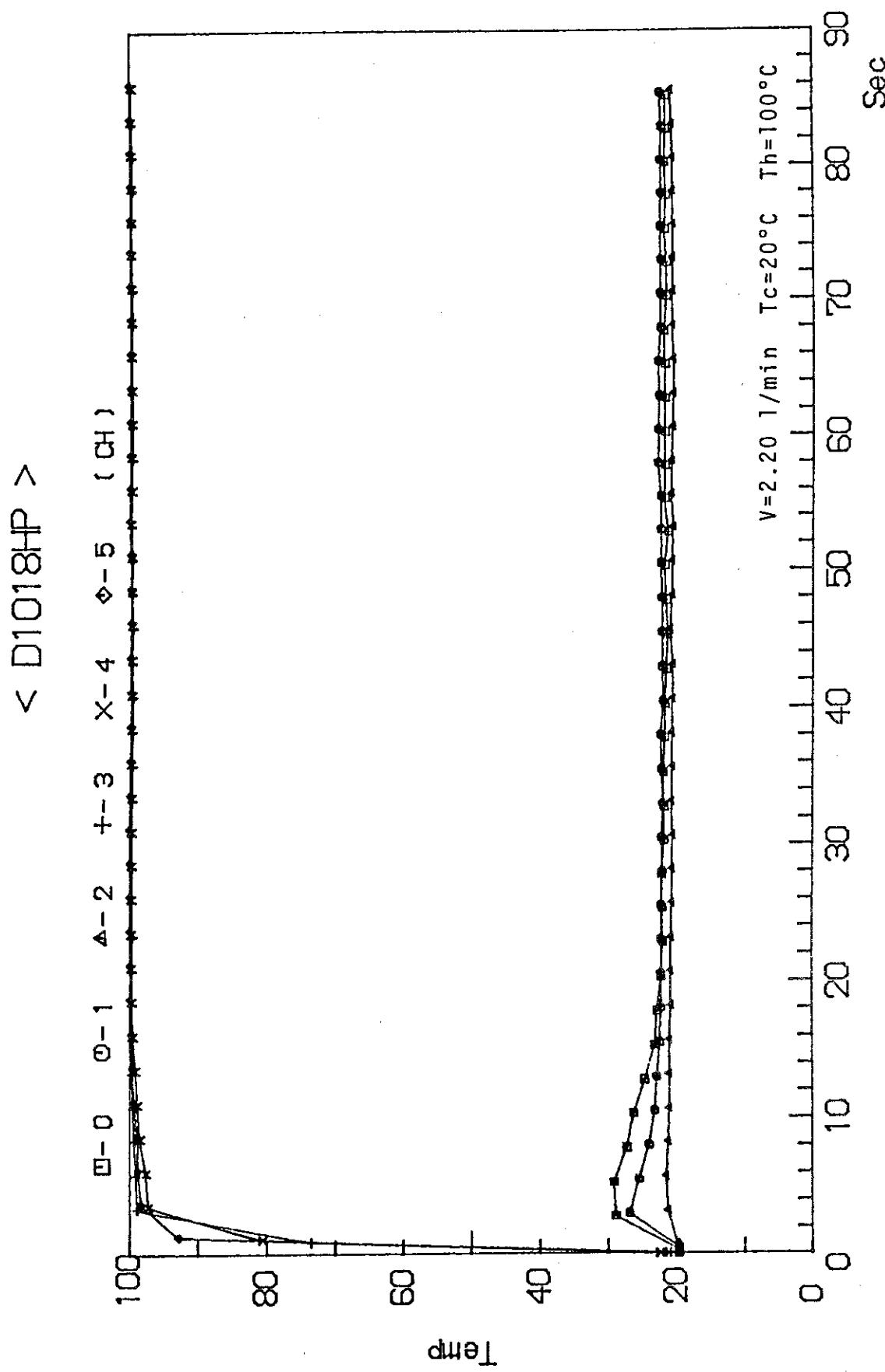
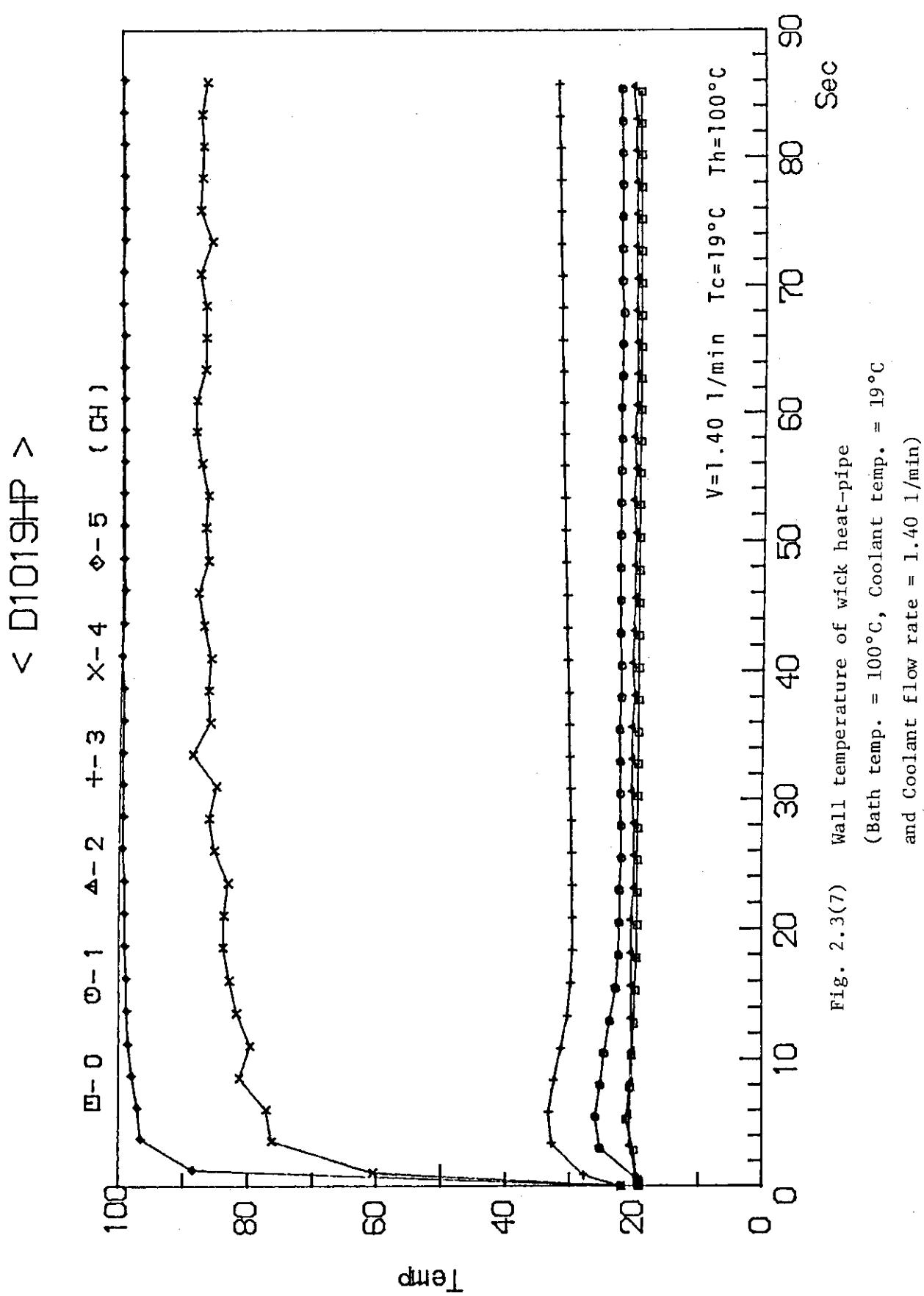


Fig. 2.3(6) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C , Coolant temp. = 20°C
and Coolant flow rate = 2.20 l/min)



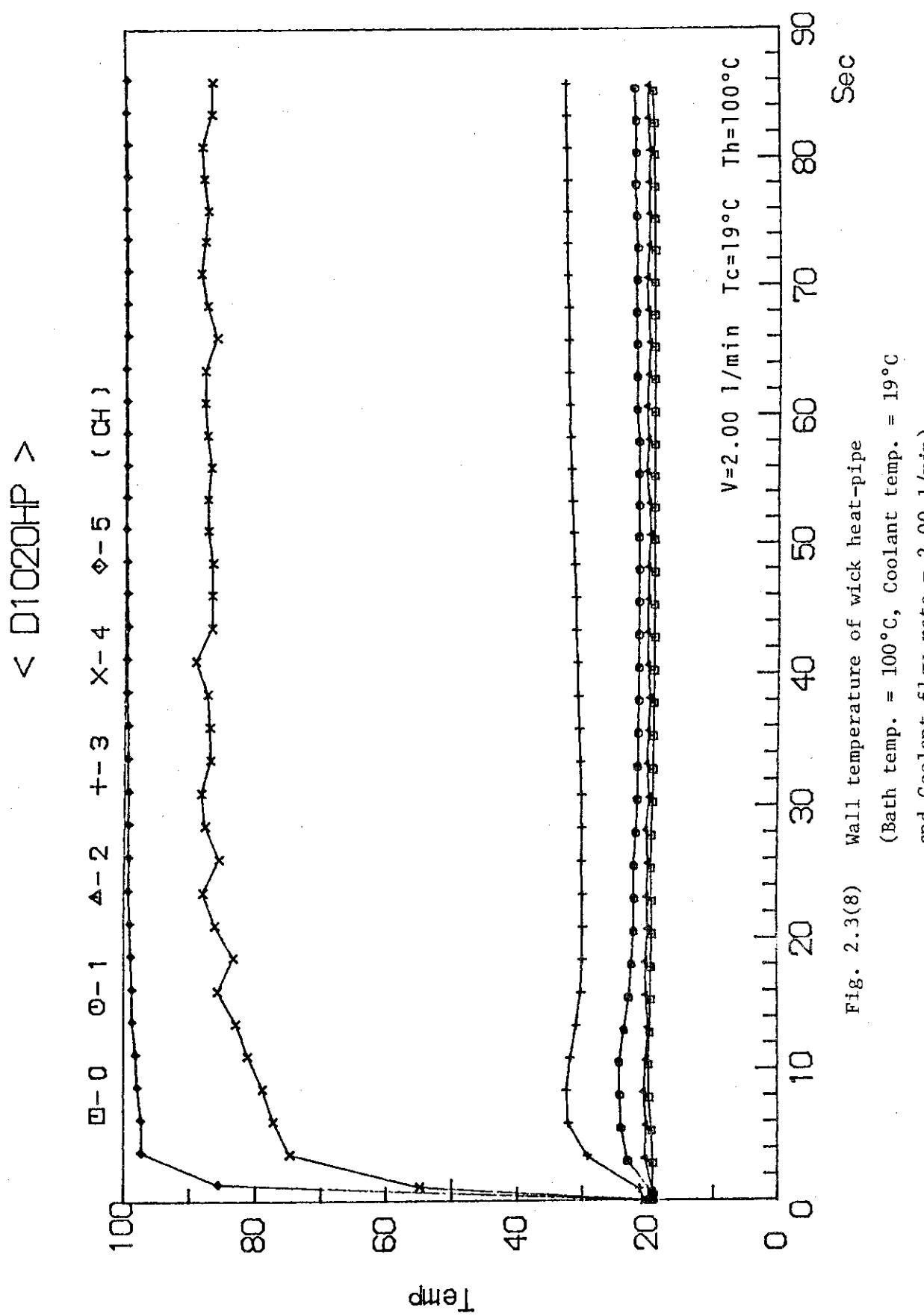


Fig. 2.3(8) Wall temperature of wick heat-pipe

(Bath temp. = 100 °C, Coolant temp. = 19 °C
and Coolant flow rate = 2.00 1/min)

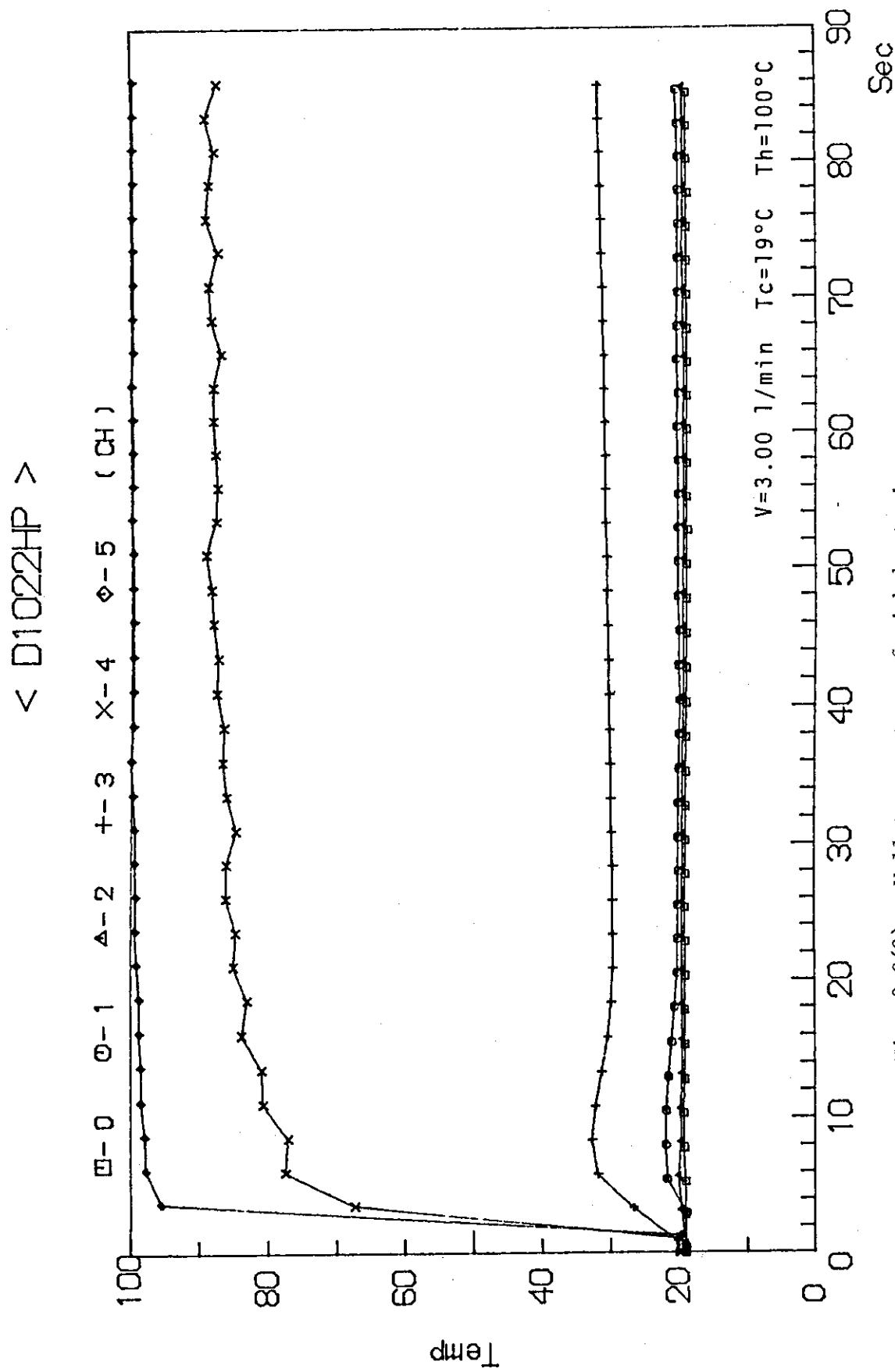


Fig. 2.3(9) Wall temperature of wick heat-pipe
(Bath temp. = 100°C , Coolant temp. = 19°C
and Coolant flow rate = 3.00 l/min)

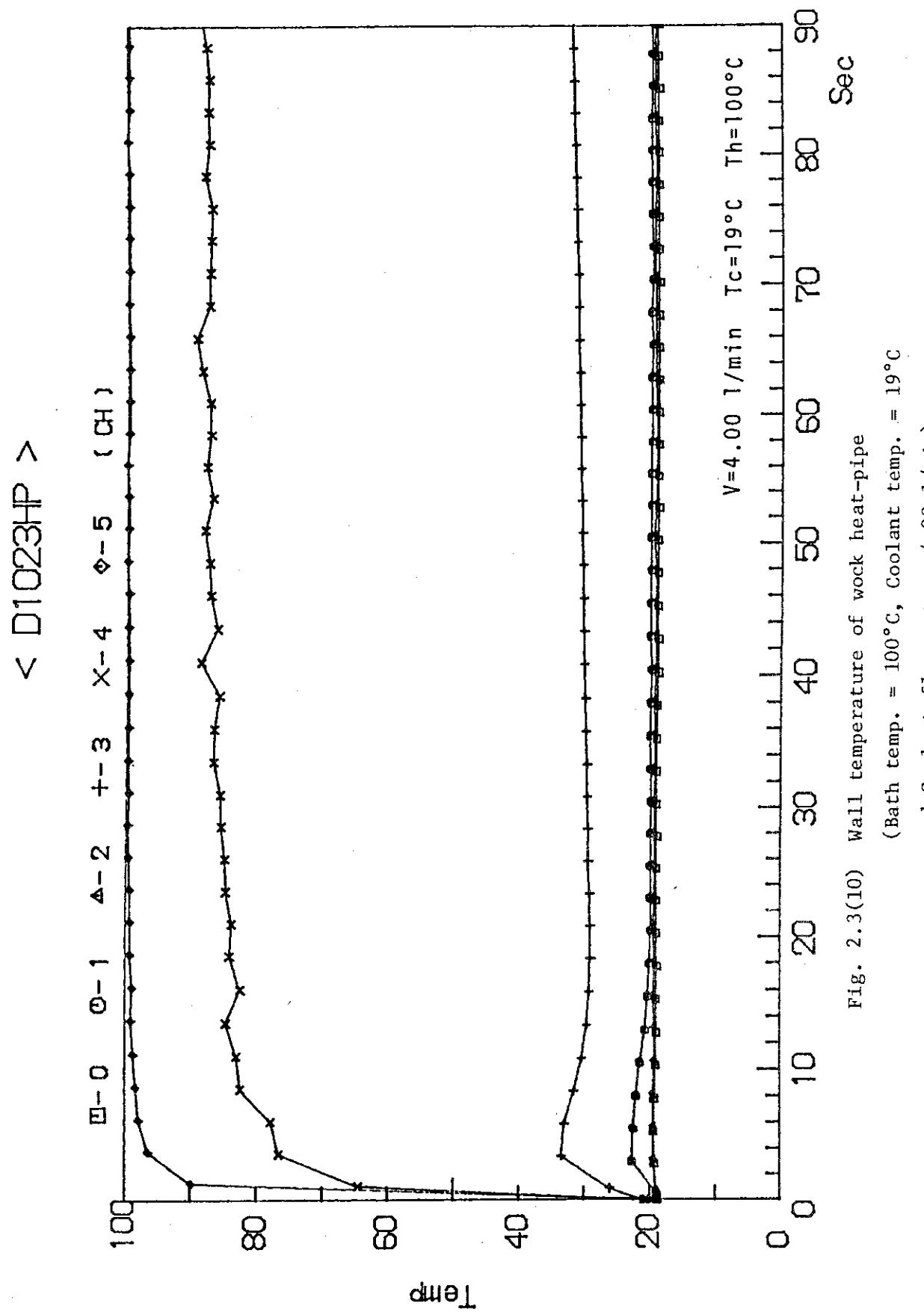


Fig. 2.3(10) Wall temperature of wock heat-pipe
(Bath temp. = 100°C, Coolant temp. = 19°C
and Coolant flow rate = 4.00 l/min)

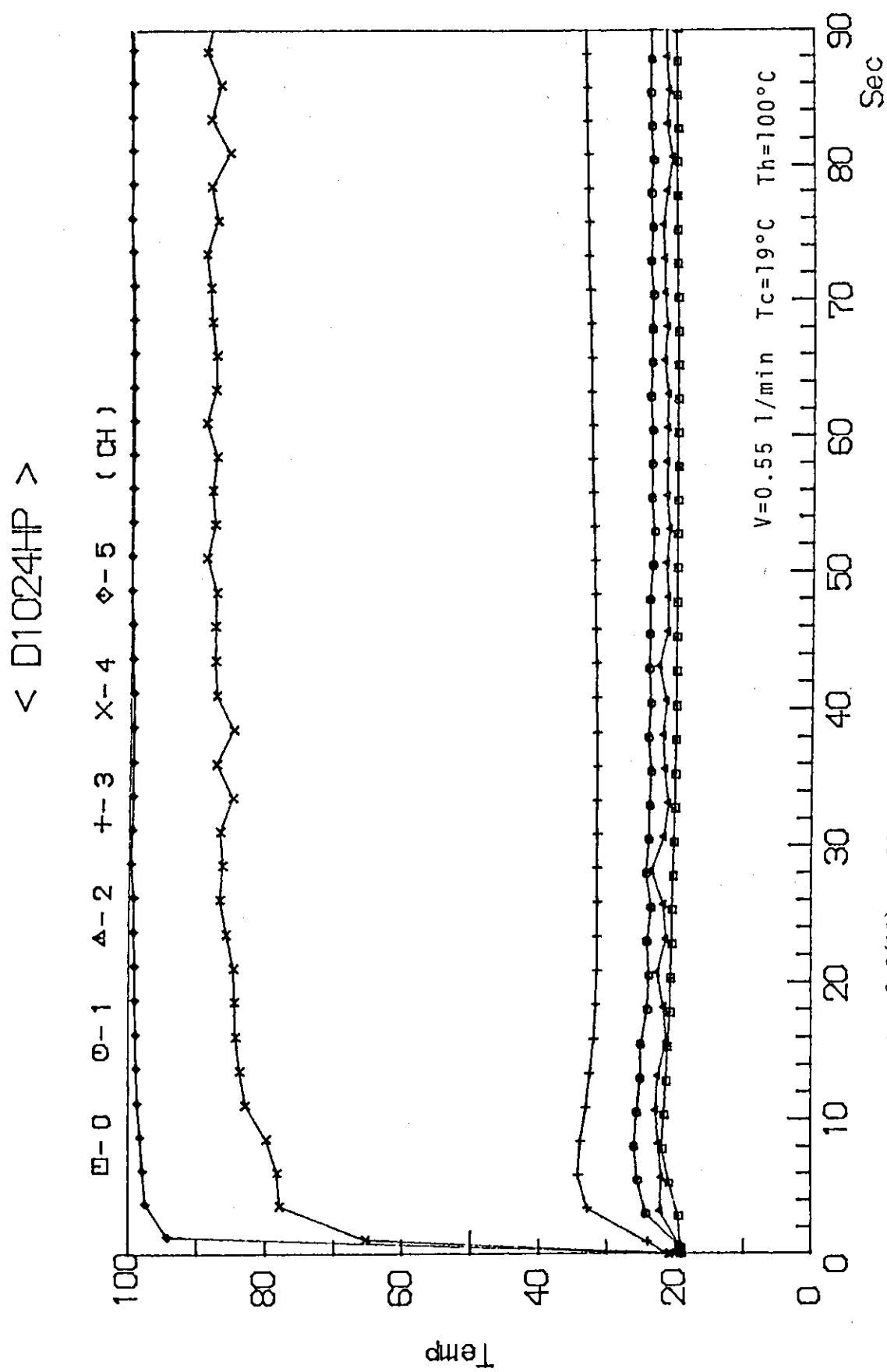


Fig. 2.3(11) Wall temperature of wick heat-pipe
 (Bath temp. = 100°C , Coolant temp. = 19°C
 and Coolant flow rate = 0.55 l/min)

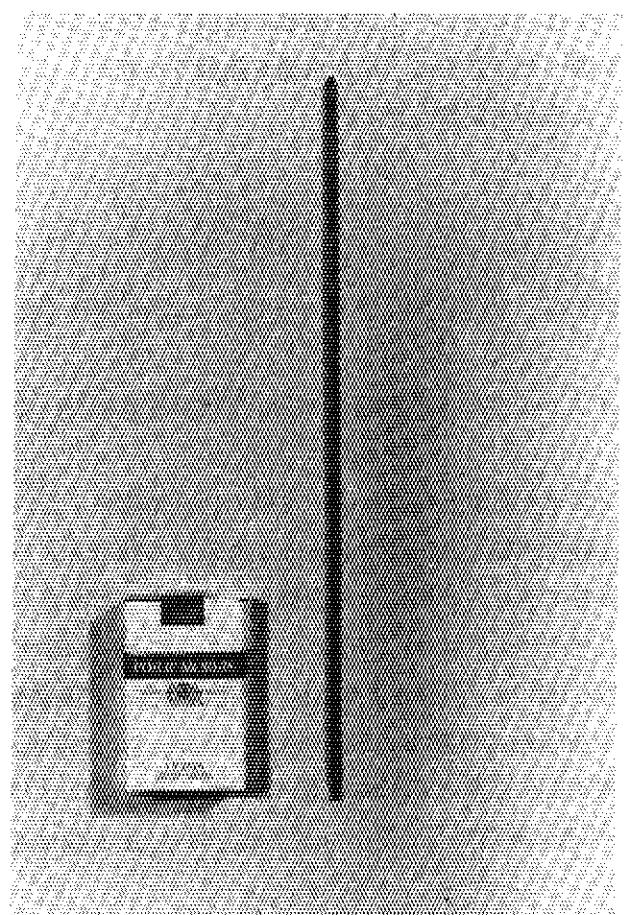


Photo. 2.1 Wick heat-pipe

3. 熱サイフォン式ヒートパイプ及びVCHPによる過渡応答に関する実験

3.1 目的

本実験は、熱サイフォン式ヒートパイプの過渡応答特性を求める目的とした。ヒートパイプ蒸発部の熱負荷の急変は、ヒートパイプを温水に浸漬する方法を用いた。応答特性はヒートパイプ壁面の温度変化を調べた。さらに、冷却水量を幾通りか変え、ヒートパイプ壁面の温度変化にどのような影響を与えるかも実験した。

3.2 実験装置

実験は、熱サイフォン式ヒートパイプ及び熱サイフォン式VCHP（可変コンダクタンスヒートパイプ）を用いた。

装置はFig. 3.1に示すように図の上部が冷却部分、下部が加熱部分、そして中間部が断熱部分である。

冷却系は、水槽→ポンプ→流量計→実験装置→水槽という循環系にし、凝縮部で使用される冷却水は一定温度、一定流量に制御した。またFig. 3.2に示す冷却水ノズルより入った冷却水は、ヒートパイプの外側にあるアクリルの筒により直接ヒートパイプにあたらないようにした。

実験に使用したヒートパイプの形状は、直径8φ、長さ500mmの熱サイフォン式ヒートパイプ及び熱サイフォン式VCHPで、内径は6.8mm、材質は銅製、作動流体は水(3.4cc)で液面はヒートパイプ下端から94mmの位置である。外観をPhoto. 3.1に示す。熱電対はFig. 3.1に示す1~10の位置に放電加工により深さ0.3mm、幅0.3mm、長さ5mmの溝を彫り、直径0.1mmのクロメル・アルメル(CA)熱電対を高温ハンダで取り付け、出力端は常時測定できるようペンレコーダーに接続した。

3.3 実験方法

実験は、Fig. 3.3で示すように、最初ヒートパイプを空気中に放置しておき、測定開始と同時に、瞬時に温水の中に蒸発部を浸漬し、ヒートパイプ壁面温度の過渡時変化を測定した。温水での加熱は、約60秒間続けたのちヒートパイプを温水の中から引抜き、引抜時の温度の変化も調べた。

温水は、実験開始まで攪拌器で一様温度にした。実験は攪拌器を止め、温水の動きが止まつてから行なった。

実験は、冷却水量、冷却水温、加熱温度をパラメータとして行った。

また、同じ条件で、定常実験を行った。

3.4 実験結果及び考察

熱サイフォン式ヒートパイプによる過渡応答に関する実験条件を、Table 3.1 及び 3.2 に示す。また、過渡時の温度変化を Fig. 3.4(1)から Fig. 3.4(69)に示す。同図は縦軸が温度(°C)，横軸が時間(sec)である。測定点のNo.2 は凝縮部No.3，4 は断熱部 No.6，8，10 は蒸発部の壁面温度である。

実験は、ヒートパイプを浸漬する加熱水の温度を 95, 90, 85, 75, 65°C，冷却水の温度を 25, 35°C，冷却水の流量を 8, 15, 25 l/min と条件を変えて行った。その結果、Fig. 3.4(70)に示すように温度変化に 3 つのパターンがあらわれた。第 1 のパターンは加熱温度が高温 (95°C) の時に起こるパターンであり、Fig. 3.4(2)のグラフの様に実験開始後数秒で、蒸発部は 60°C 付近、断熱部は 50°C 付近、凝縮部は 40°C 付近で定常になるものである。第 2 のパターンは加熱温度が中温 (85°C) の時に起こるパターンで、Fig. 3.4(26)のグラフの様に実験の途中で蒸発部の温度が突如下がり、それと同時に断熱部及び凝縮部の温度が突如上がるという現象が一度から数度起こるものである。第 3 のパターンは加熱温度が低温 (65°C) の時に起こるパターンで、Fig. 3.4(37)のグラフの様に、蒸発部における No.8, 6 の位置の温度が徐々に下がっていく傾向がみられる。

まず第 1 のパターンは、ヒートパイプ内の作動流体が激しく沸騰し、作動流体が上部まで吹上げ、大量の蒸気を発生し続けるために生ずる現象と考えられる。第 2 のパターンは、作動流体が間欠的に突沸を起こし、ヒートパイプ上部まで吹き上がるために生ずる現象であり、第 3 のパターンは、作動流体が吹き上がることもなく、上部から徐々に沸騰していくため生ずる現象と考えられる。

これらの現象をふまえて、表面温度変化に対する冷却水流量の影響をみてみると、加熱温度が高温 (95°C) の場合、Fig. 3.4(67)に示すように冷却水量が 25, 15 l/min と多い場合には沸騰開始時間に多少の差はあるが、第 1 のパターンの現象である激しい沸騰現象が現れている。それに対し冷却水量が 8 l/min と少なくなると、第 2 のパターンの現象、すなわち間欠的な突沸現象が現れているのがわかる。また、加熱温度が中温 (85°C) の場合、Fig. 3.4(68)に示すように冷却水量が 25 l/min の時に一度だけ突沸現象が現れているだけであり、冷却水流量の与える影響は余りないものと思われる。加熱温度が低温 (65°C) の場合には、Fig. 3.4(69)に示すように冷却水流量による現象の違いは現れず、作動流体の上部から沸騰していく現象が現れている。以上のことから、熱サイフォン式ヒートパイプの過渡応答特性に対する冷却水の影響は流量の減少とともに沸騰開始時間が遅れることがわかった。

また、実験の再現性については、実験は同じ条件で 3 回行った。作動流体が激しい沸騰を起こしているか、もしくは、加熱温水が低温 (65°C) の時には再現性が非常に良いことがわかるが、Fig. 3.4(13)と Fig. 3.4(14)を比べてみても分かるように間欠的な突沸現象が現れるとそこからの再現性が非常に悪くなるのが分かる。

以上のことにより、ヒートパイプの過渡応答特性に対して突沸が与える影響は無視できないことが分かった。Fig. 3.4(71)に初期突沸開始時刻と突沸周期とを示してみた。グラフの上半分が突沸の周期、下半分が初期突沸開始時刻、横軸は加熱温水の温度である。まず、突沸の周期については、温水の温度、冷却水流量のどちらにも依存しないことが分かる。しかし、突沸開始時刻は、

加熱温水の温度が高くなると早くなっていることがわかる。

さらに、この過渡応答実験の参考として定常実験を行い、定常時の各測定点の温度を調べてみた。実験結果は、各測定点ごとに同じ実験条件の図に書き込んだ。

次に、同じ熱サイフォン式の VCHP による実験を行った。実験条件を Table 3.3 に示す。また、過渡時の温度変化を示す図は Fig. 3.5 (1)から Fig. 3.5 (10)に示す。縦軸が温度(°C)、横軸が時間(sec)で、測定点No.2 は凝縮部、No.3, 4 は断熱部、No.6, 8, 10 は蒸発部の壁面温度となっている。

実験は、加熱温度を 95, 85, 65°C、冷却水流量を 8, 15, 25 l/min と変えて行った。しかし結果はどのグラフもすべて同じ様な傾向を示し、VCHP 内部の作動流体が沸騰を起こしている現象を示していない。このため同じ形状の銅棒をモデルとした軸方向の熱伝導を計算した。解析の結果、断熱部の壁面温度の変化は、実験で得られた特性と同じ様な傾向を示した。この結果より、実験で用いた VCHP は、初期封入圧力が高いため、実験時間内では作動流体は沸騰していないと考えられる。

3.5 まとめ

これまで得られた実験結果を整理すると次の通りである。

- (1) 過渡変化に対する応答時間は、加熱温度が高温の場合、加熱部、断熱部、冷却部とも約 3 秒程度であるが、加熱温度が低温の場合は、加熱部が約 6 秒、断熱部が約 8 秒、冷却部が約 4 秒である。
- (2) 加熱温度が高温(95°C)の場合、ヒートパイプの温度は沸騰開始後、定常化する。
- (3) 加熱温度が中温(85~90°C)の場合、10~60 sec 程の周期で突沸現象が現れる。
- (4) 加熱温度が低温(65~75°C)の場合、ヒートパイプ各部の温度はならかな温度変化となる。
- (5) 加熱温度一定で、冷却水量を変化させると、冷却水量の減少にともない沸騰開始時間が遅れる。
- (6) 冷却水量一定で、加熱温度を変化させると、加熱温度の低下にともない顕著な沸騰現象がみられなくなる。
- (7) 突沸現象が現れると、実験の再現性が著しく低下する。
- (8) 突沸の周期は、加熱温度、冷却水量のどちらにも依存しない。
- (9) 突沸開始時間は、加熱温度に依存する。
- (10) VCHP の実験は、内部圧力が高くて、伝熱面の一部でしかヒートパイプとして働くかなかったと推定できる。

Table 3.1 Experimental conditions for gravity assisted heat-pipe test runs

Run Number	Figure Number	Coolant Rate (l/min)	Coolant Temp. (°C)	Water Bath Temp. (°C)
D1047P	Fig.3.4(1)	25	25	95
D1048P	Fig.3.4(2)	25	25	95
D1049P	Fig.3.4(3)	25	25	95
D1050P	Fig.3.4(4)	15	25	95
D1051P	Fig.3.4(5)	15	25	95
D1052P	Fig.3.4(6)	15	25	95
D1053P	Fig.3.4(7)	8	25	95
D1054P	Fig.3.4(8)	8	25	95
D1055P	Fig.3.4(9)	8	25	95
D1056P	Fig.3.4(10)	25	25	95
D1057P	Fig.3.4(11)	25	25	95
D1058P	Fig.3.4(12)	25	25	95
D1059P	Fig.3.4(13)	15	25	90
D1060P	Fig.3.4(14)	15	25	90
D1061P	Fig.3.4(15)	15	25	90
D1062P	Fig.3.4(16)	8	25	90
D1063P	Fig.3.4(17)	8	25	90
D1064P	Fig.3.4(18)	8	25	90
D1065P	Fig.3.4(19)	25	25	85
D1066P	Fig.3.4(20)	25	25	85
D1067P	Fig.3.4(21)	25	25	85
D1068P	Fig.3.4(22)	15	25	85
D1069P	Fig.3.4(23)	15	25	85
D1070P	Fig.3.4(24)	15	25	85

Table 3.1 (Continued)

Run Number	Figure Number	Coolant Rate (l/min)	Coolant Temp. (°C)	Water Bath Temp. (°C)
D1071P	Fig.3.4(25)	8	25	85
D1072P	Fig.3.4(26)	8	25	85
D1073P	Fig.3.4(27)	8	25	85
D1074P	Fig.3.4(28)	25	25	75
D1075P	Fig.3.4(29)	25	25	75
D1076P	Fig.3.4(30)	25	25	75
D1077P	Fig.3.4(31)	15	25	75
D1078P	Fig.3.4(32)	15	25	75
D1079P	Fig.3.4(33)	15	25	75
D1080P	Fig.3.4(34)	8	25	75
D1081P	Fig.3.4(35)	8	25	75
D1082P	Fig.3.4(36)	8	25	75
D1083P	Fig.3.4(37)	25	25	65
D1084P	Fig.3.4(38)	25	25	65
D1085P	Fig.3.4(39)	25	25	65
D1086P	Fig.3.4(40)	15	25	65
D1087P	Fig.3.4(41)	15	25	65
D1088P	Fig.3.4(42)	15	25	65
D1089P	Fig.3.4(43)	8	25	65
D1090P	Fig.3.4(44)	8	25	65
D1091P	Fig.3.4(45)	8	25	65
D1092P	Fig.3.4(46)	8	25	85
D1093P	Fig.3.4(47)	8	25	85
D1094P	Fig.3.4(48)	8	25	85
D1095P	Fig.3.4(49)	15	25	90
D1096P	Fig.3.4(50)	15	25	90

Table 3.1 (Continued)

Run Number	Figure Number	Coolant Rate (l/min)	Coolant Temp. (°C)	Water Bath Temp. (°C)
D1097P	Fig.3.4(51)	15	25	90
D1098P	Fig.3.4(52)	15	25	95
D1099P	Fig.3.4(53)	15	25	95
D1100P	Fig.3.4(54)	15	25	95
D1101P	Fig.3.4(55)	8	35	95
D1102P	Fig.3.4(56)	8	35	95
D1103P	Fig.3.4(57)	8	35	95
D1104P	Fig.3.4(58)	15	35	95
D1105P	Fig.3.4(59)	15	35	95
D1106P	Fig.3.4(60)	15	35	95
D1107P	Fig.3.4(61)	25	35	95
D1108P	Fig.3.4(62)	25	35	95
D1109P	Fig.3.4(63)	25	35	95
D1119P	Fig.3.4(64)	15	35	95
D1120P	Fig.3.4(65)	15	35	95
D1121P	Fig.3.4(66)	15	35	95

Table 3.2 Effect of coolant flow rate from experiment of gravity assisted heat pipe

Figure Number	Temperature of Coolant (°C)	Coolant flow rate (l/min)		
Fig. 3.4(67)	95	D1048P	D1050P	D1053P
		25	15	8
Fig. 3.4(68)	85	D1065P	D1068P	D1073P
		25	15	8
Fig. 3.4(69)	65	D1083P	D1087P	D1089P
		25	15	8

Table 3.3 Experimental conditions for variable conductance heat-pipe test runs

Run Number	Figure Number	Coolant Flow Rate (l/min)	Coolant Temp. (°C)	Water Bath Temp. (°C)
D1200P	Fig.3.5(1)	25	25	95
D1201P	Fig.3.5(2)	25	25	95
D1202P	Fig.3.5(3)	25	25	95
D1203P	Fig.3.5(4)	15	25	95
D1204P	Fig.3.5(5)	15	25	95
D1205P	Fig.3.5(6)	15	25	95
D1206P	Fig.3.5(7)	8	25	95
D1207P	Fig.3.5(8)	8	25	95
D1208P	Fig.3.5(9)	8	25	95
D1209P	Fig.3.5(10)	25	25	85
D1210P	Fig.3.5(11)	25	25	85
D1211P	Fig.3.5(12)	25	25	85
D1212P	Fig.3.5(13)	25	25	65
D1213P	Fig.3.5(14)	25	25	65
D1214P	Fig.3.5(15)	25	25	65

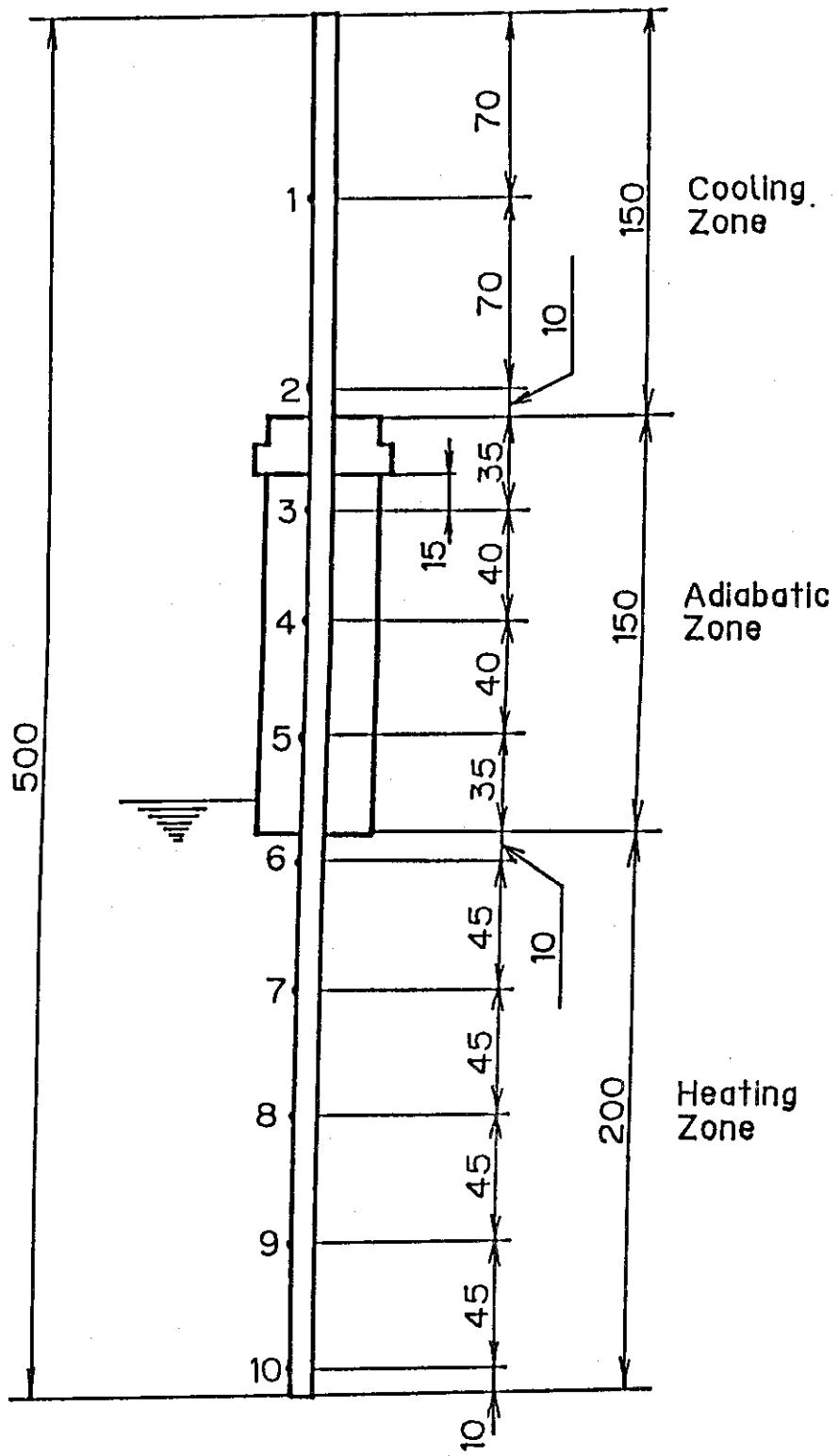


Fig. 3.1 Test section for gravity assisted and variable conductance heat-pipe tests

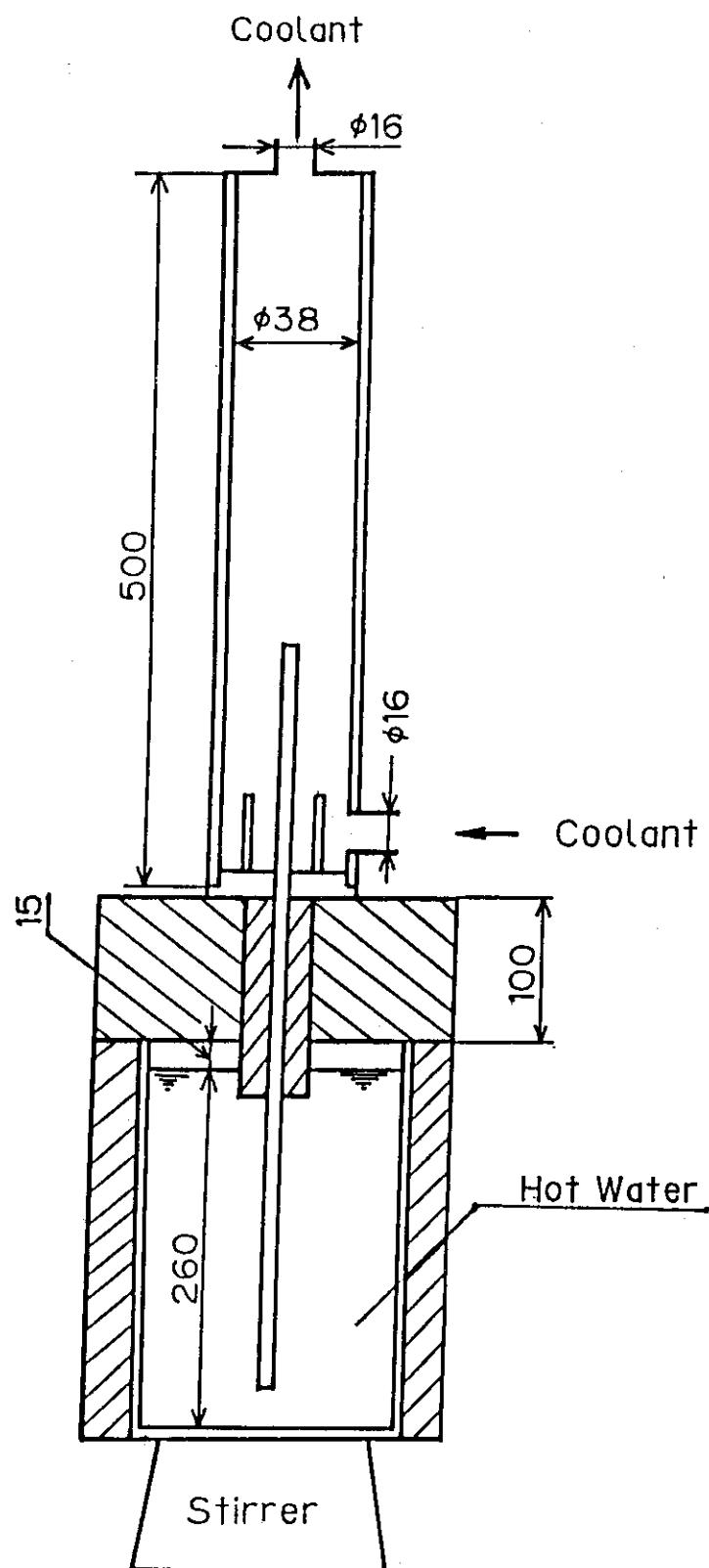


Fig. 3.2 Experimental apparatus for gravity assisted and variable conductance heat-pipe tests

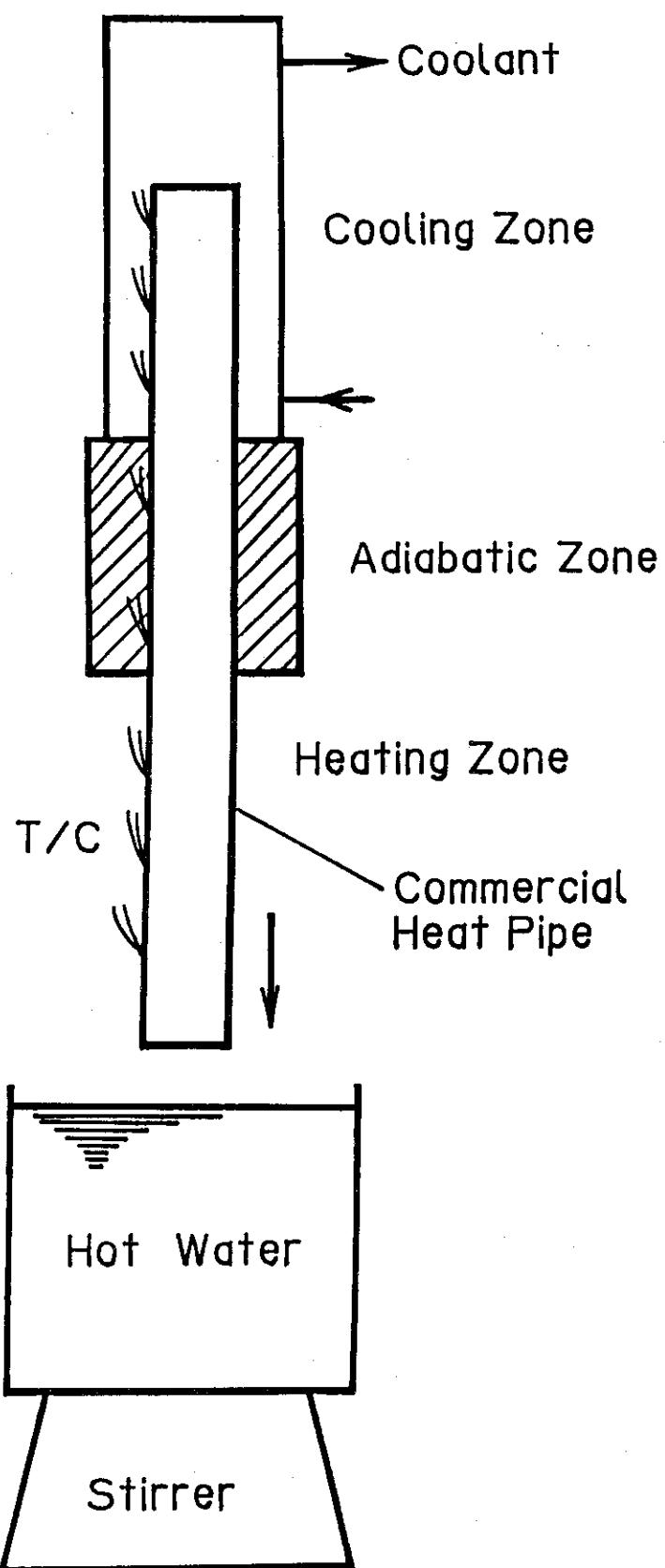


Fig. 3.3 Experimental procedure for gravity assisted and variable conductance heat-pipe tests

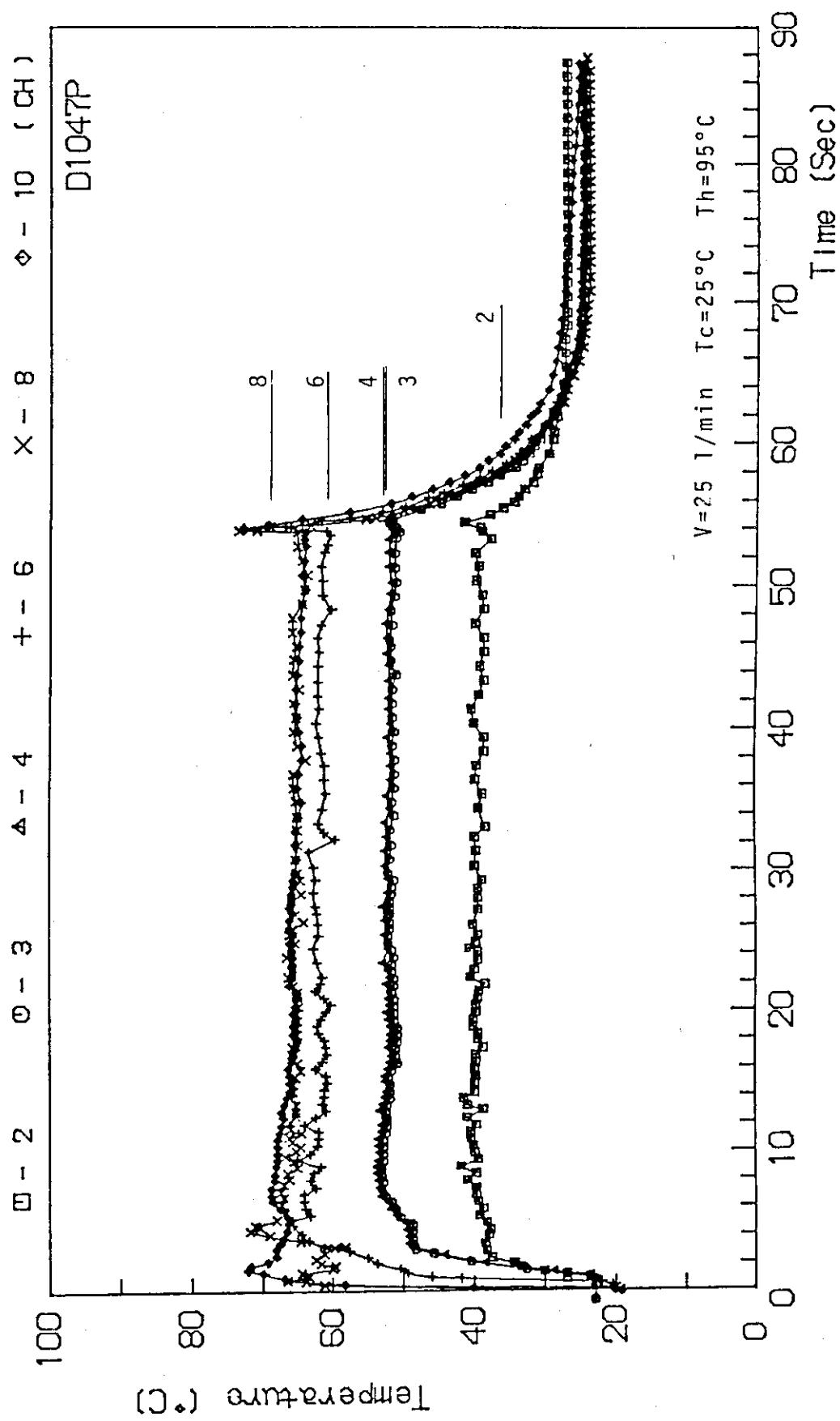


Fig. 3.4(1) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

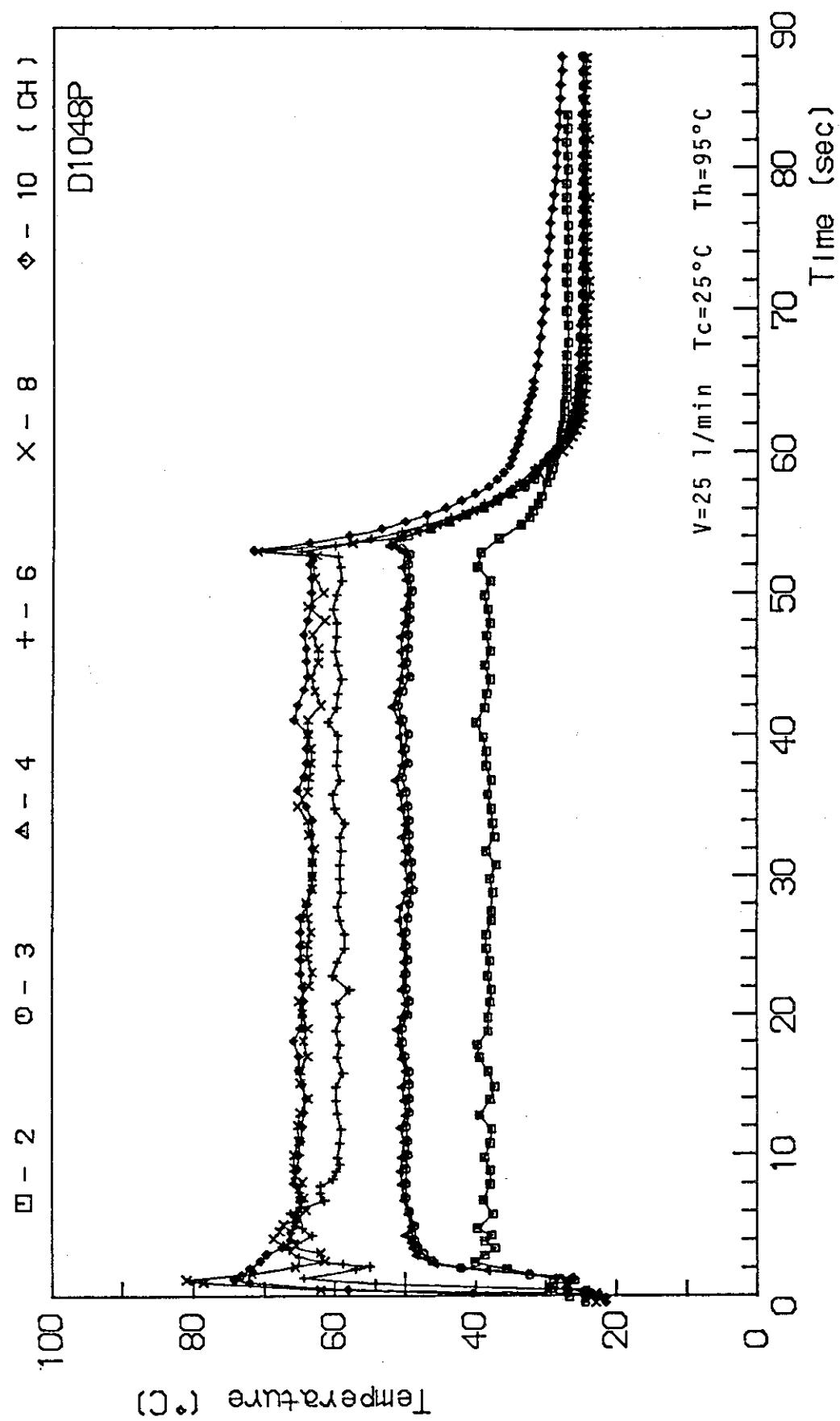


Fig. 3.4(2) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

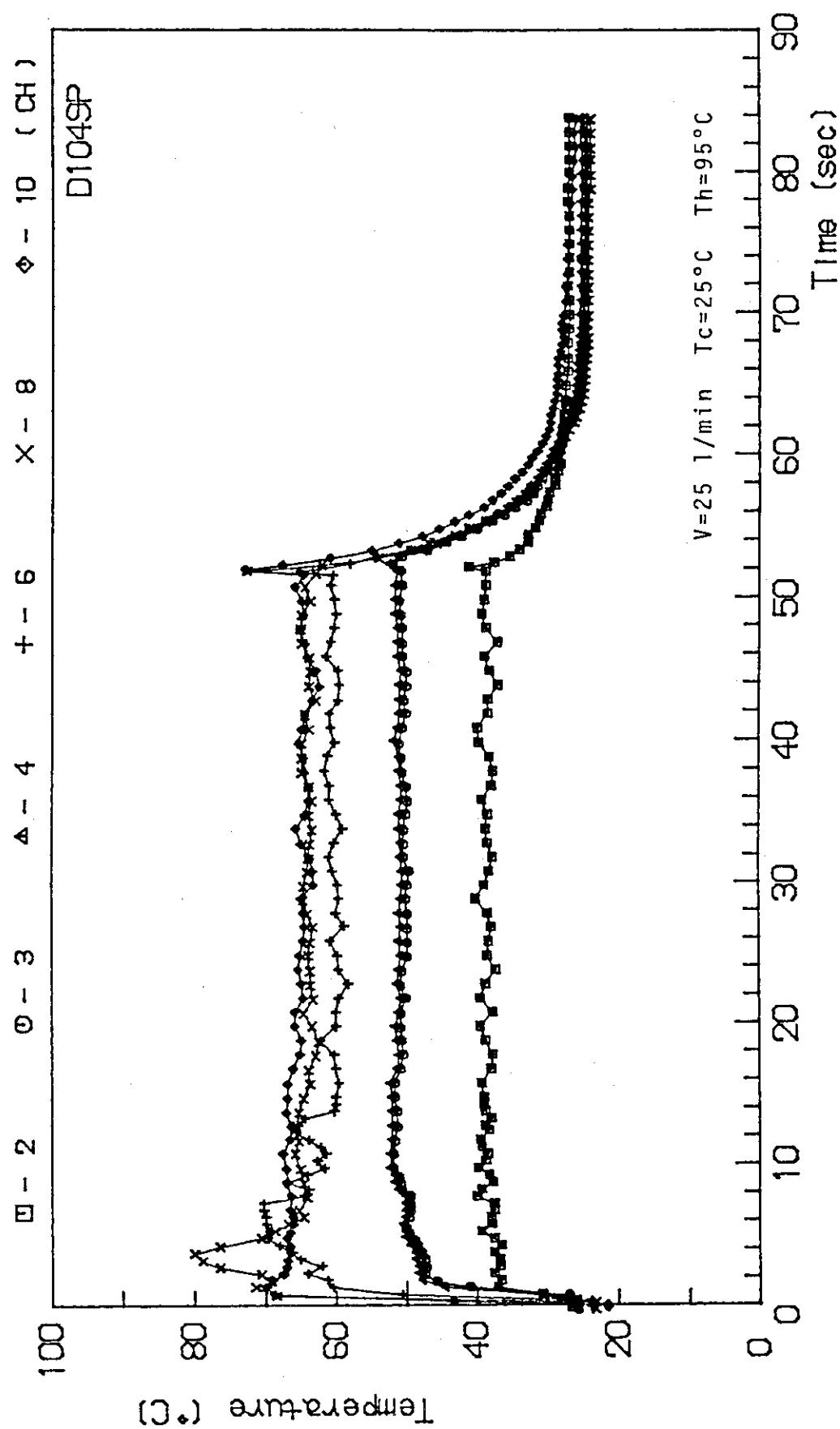


Fig. 3.4(3) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

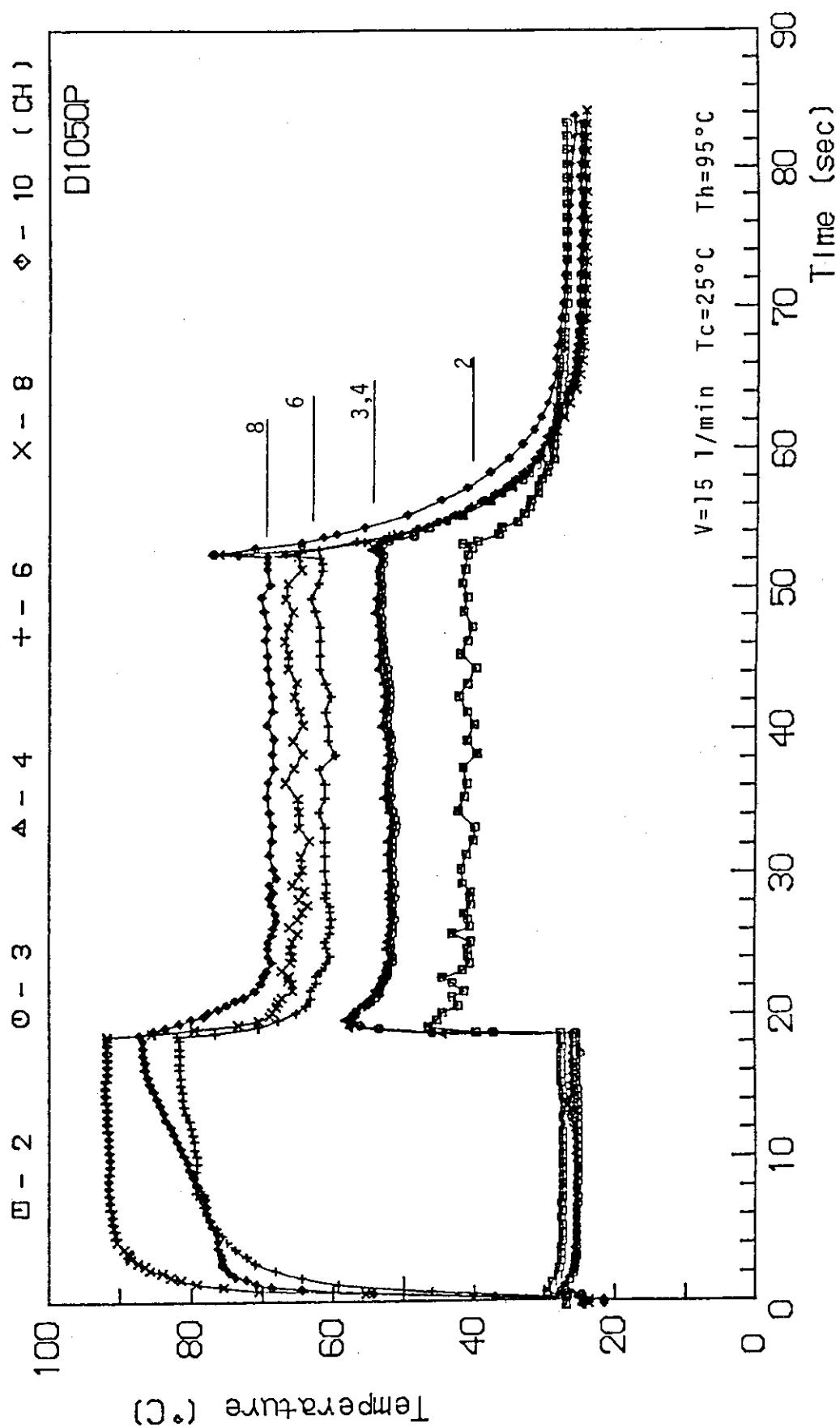


Fig. 3.4(4) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

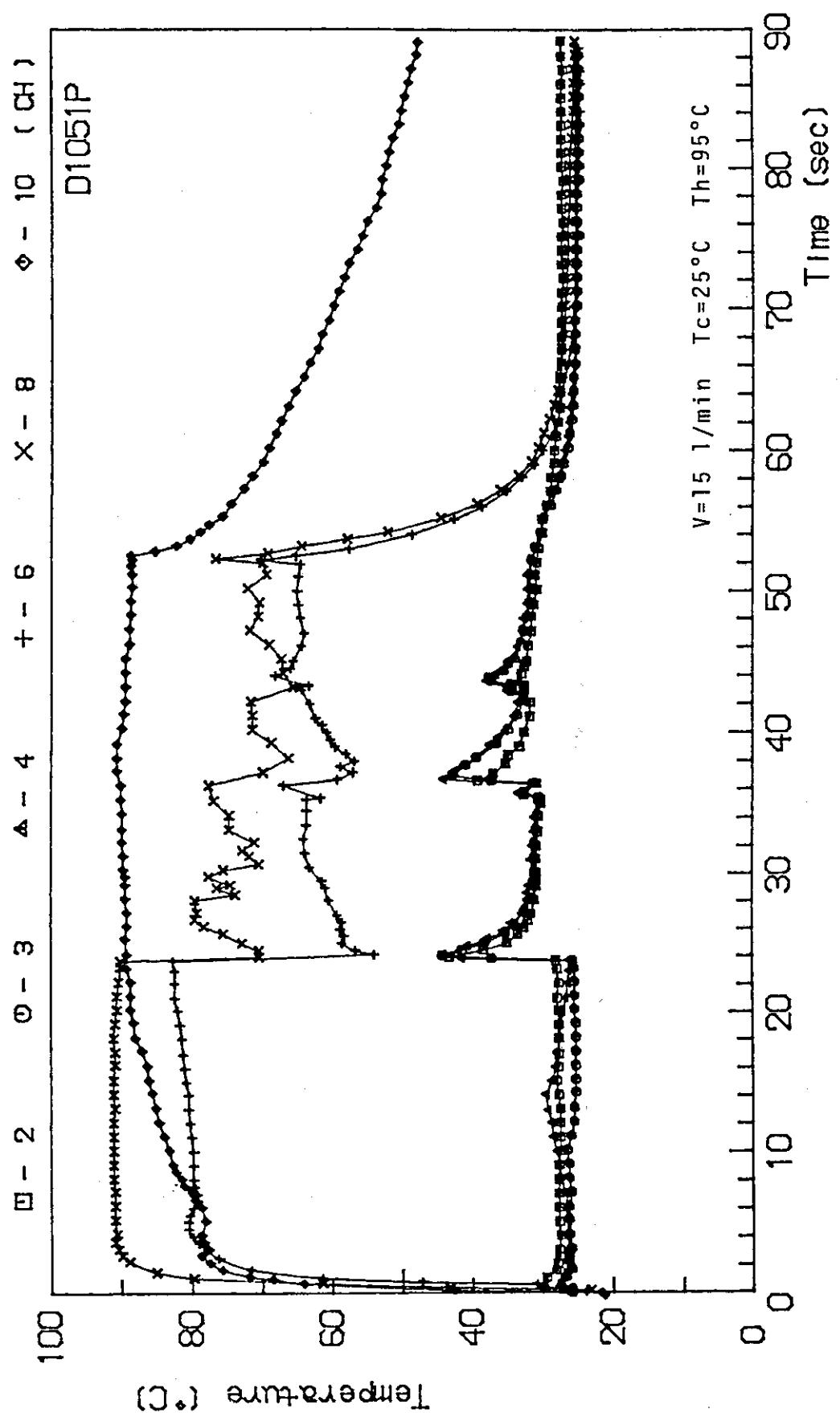


Fig. 3.4(5) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

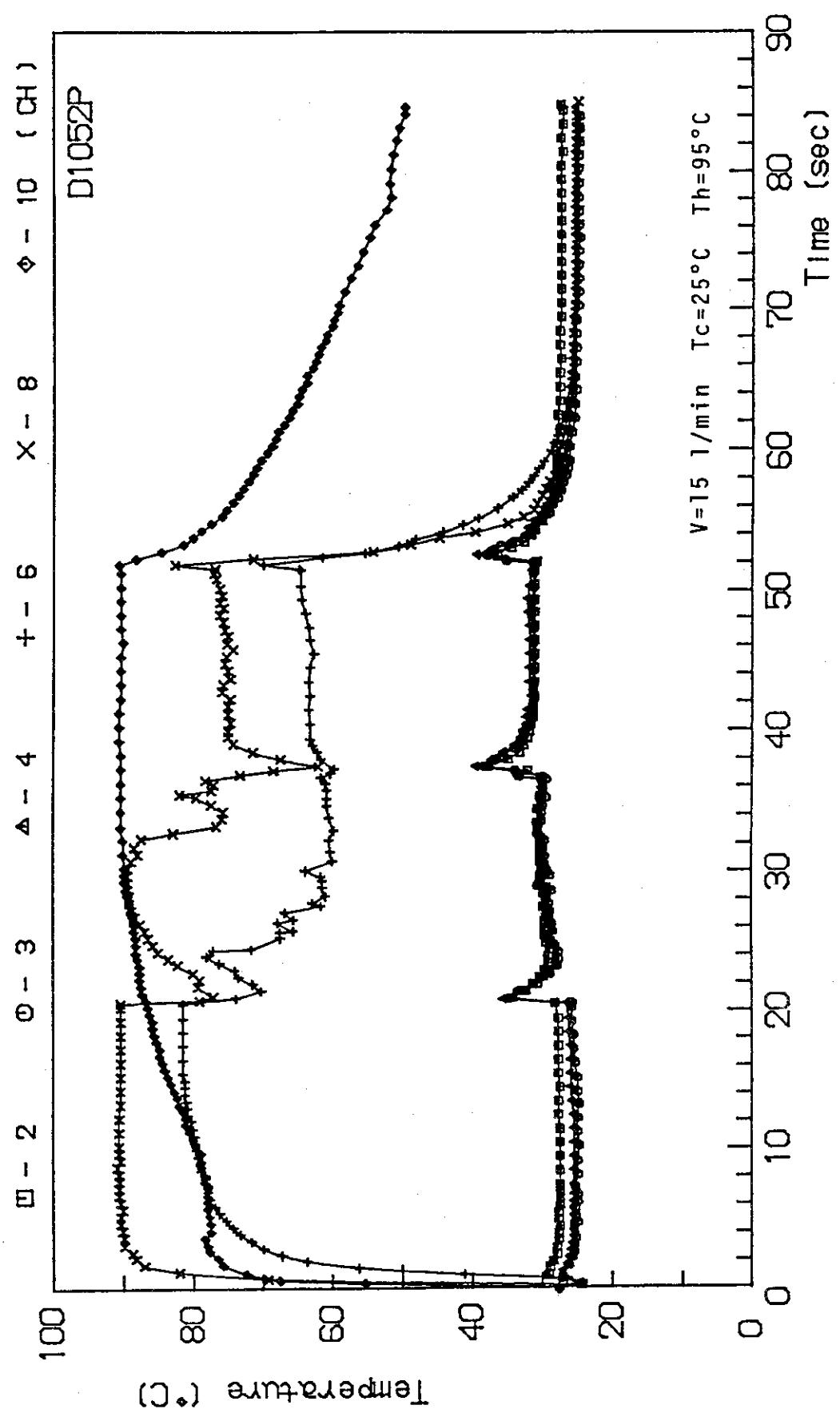


Fig. 3.4(6) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

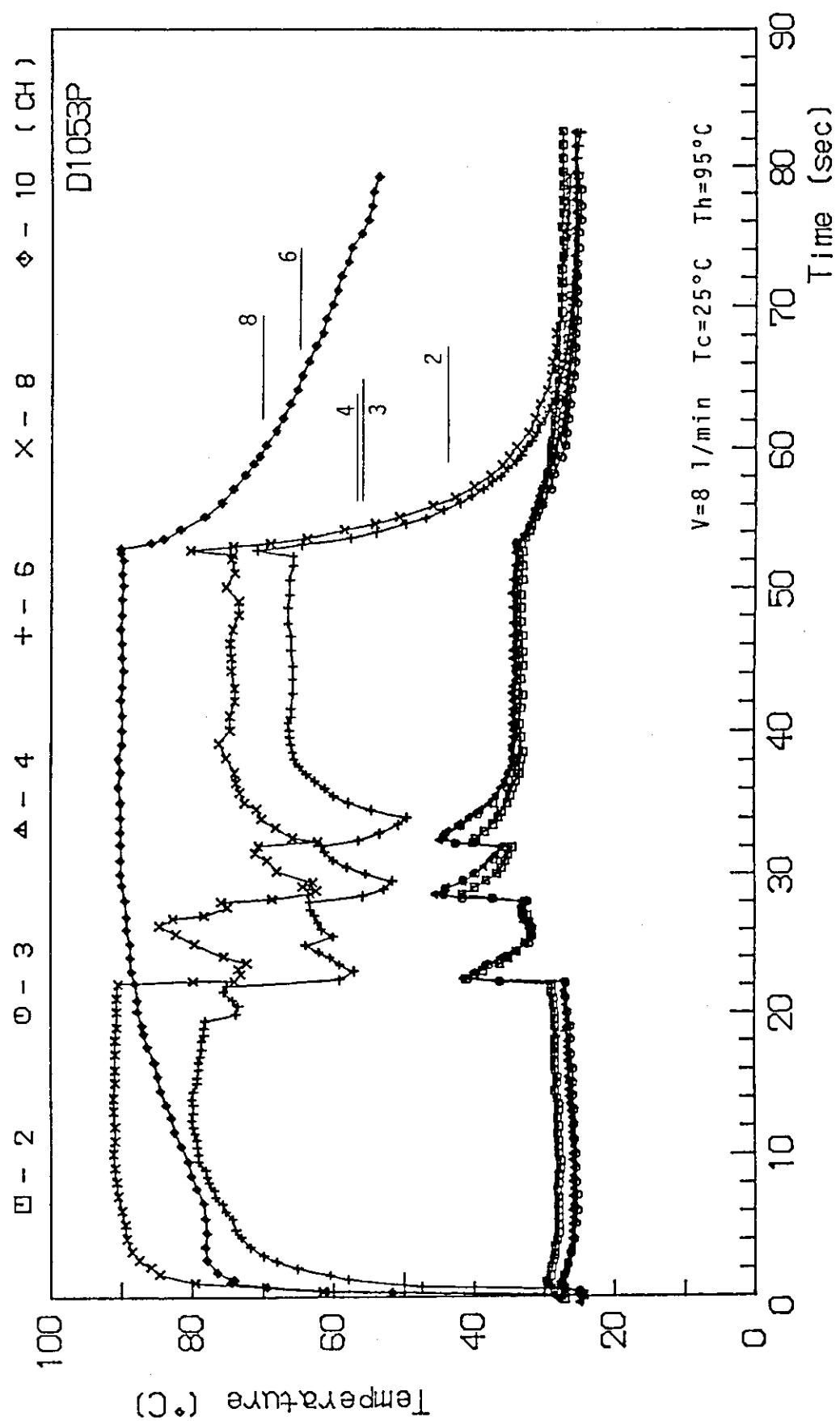


Fig. 3.4(7) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

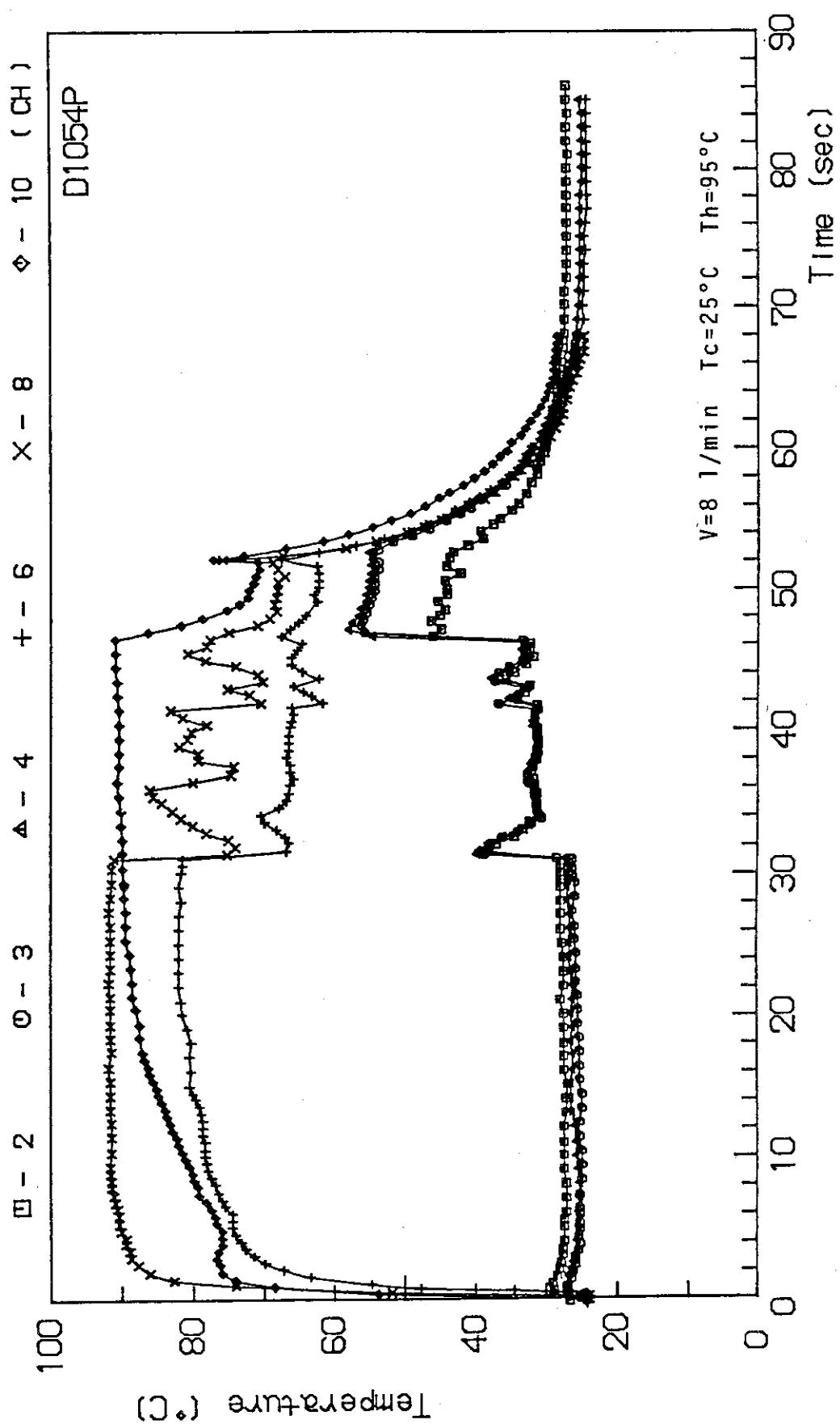


Fig. 3.4(8) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

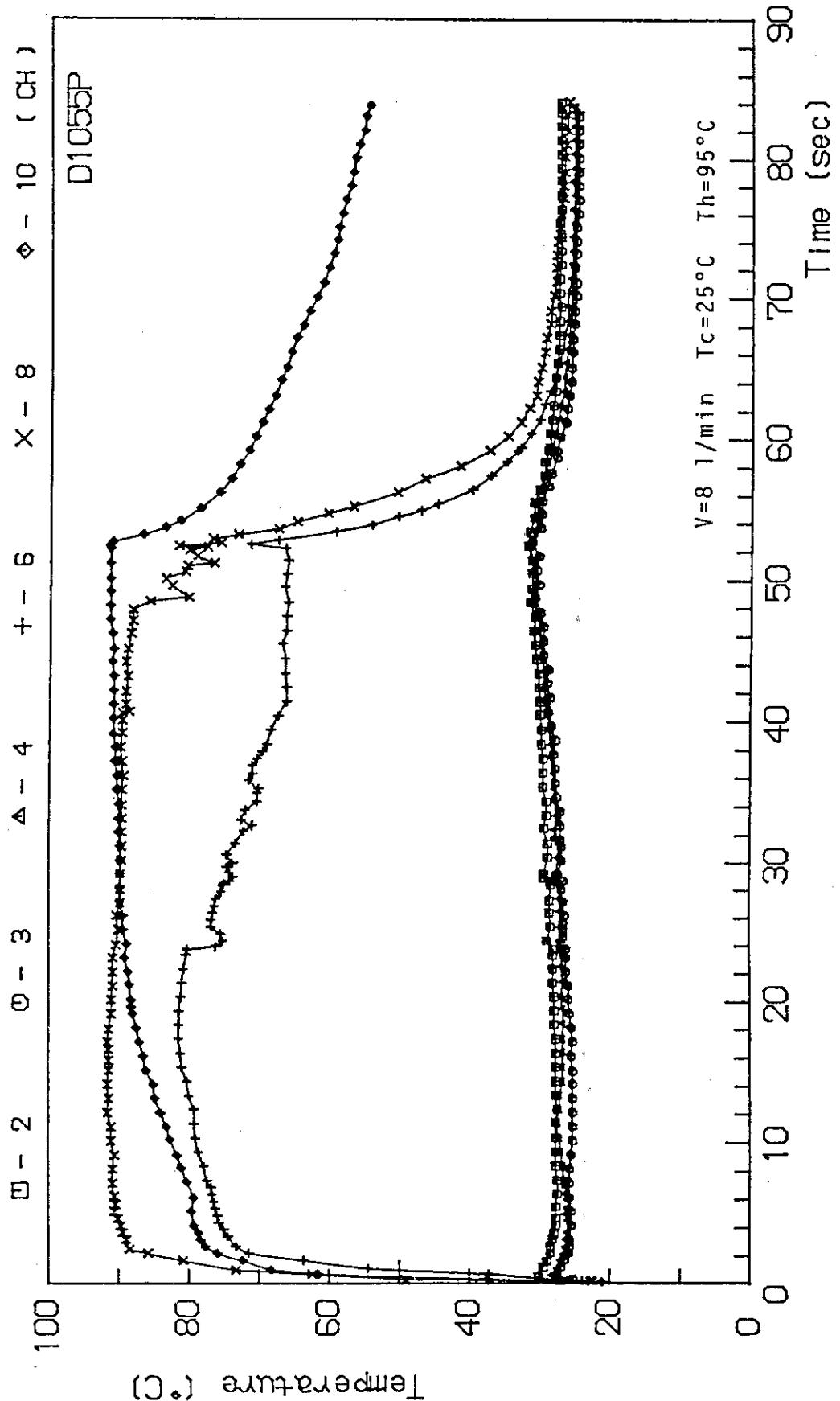


Fig. 3.4(9) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

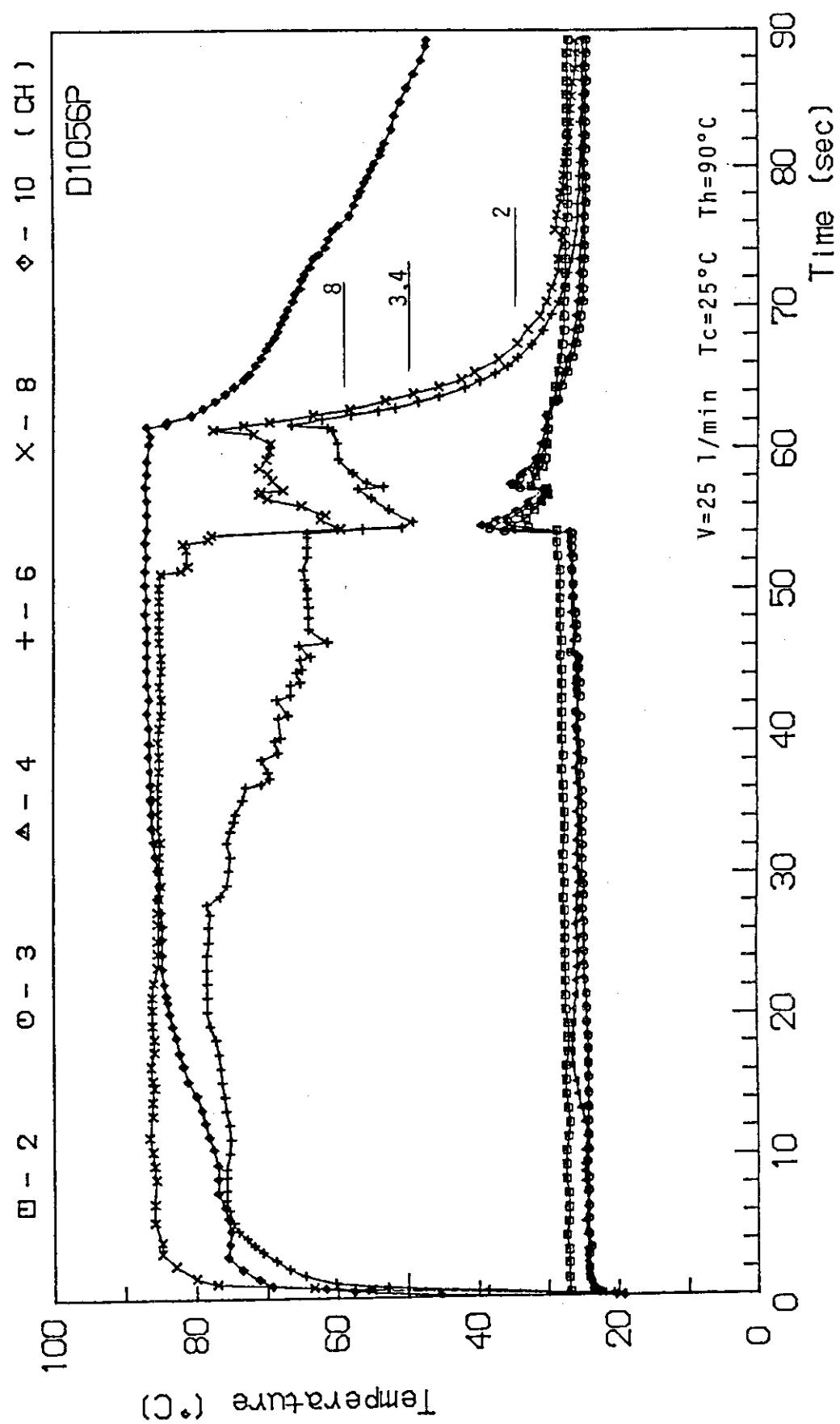


Fig. 3.4(10) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

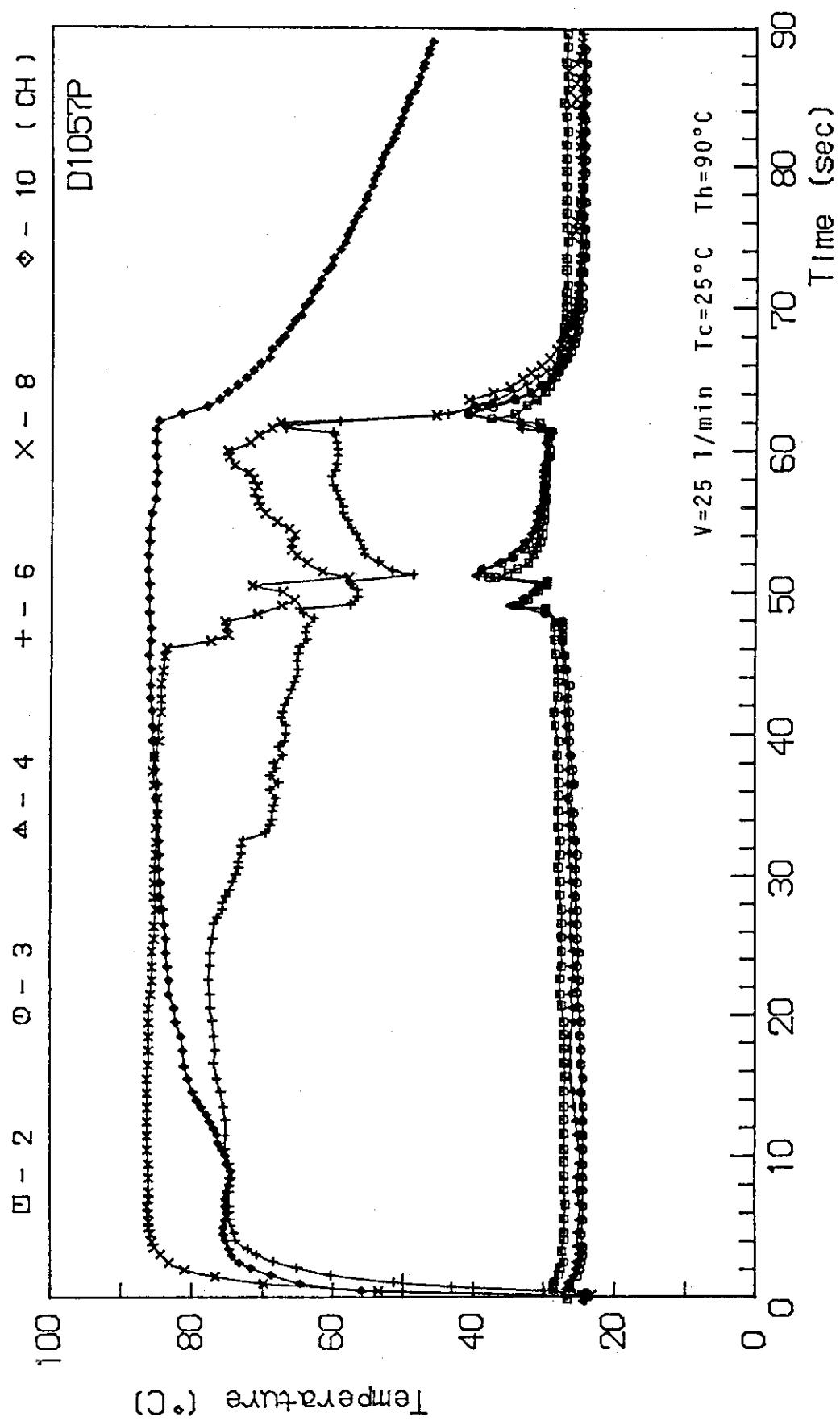


Fig. 3.4(11) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

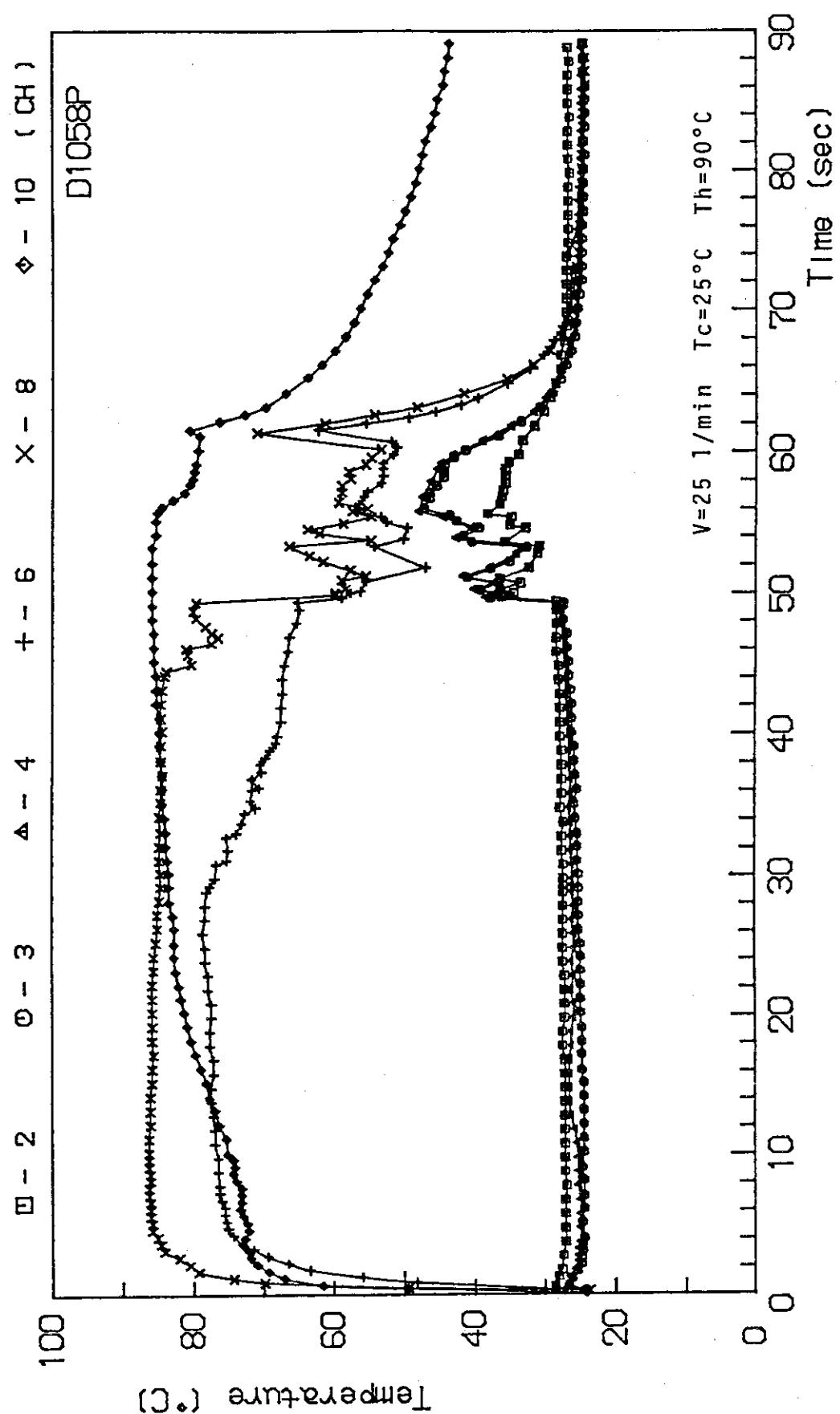


Fig. 3.4(12) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

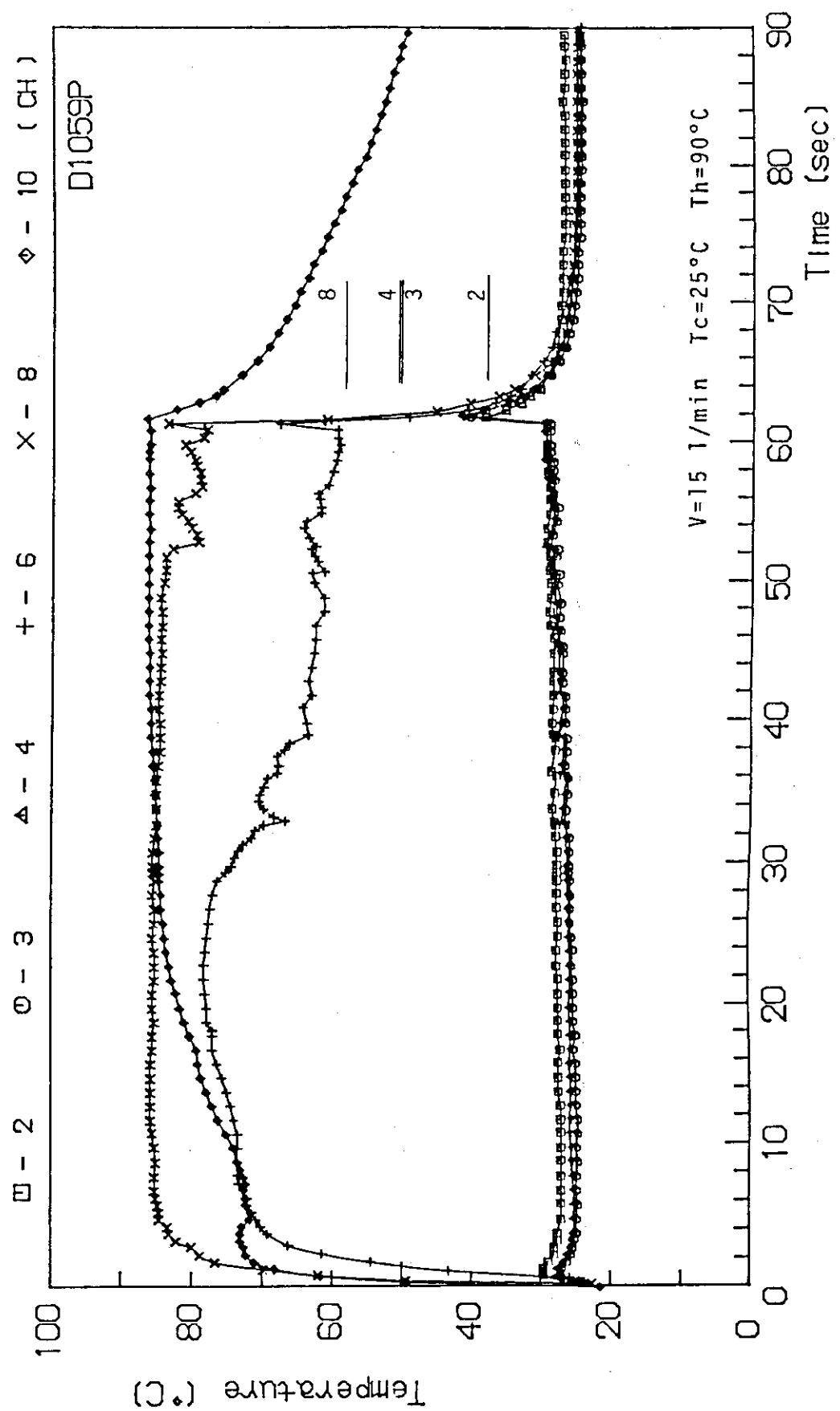


Fig. 3.4(13) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

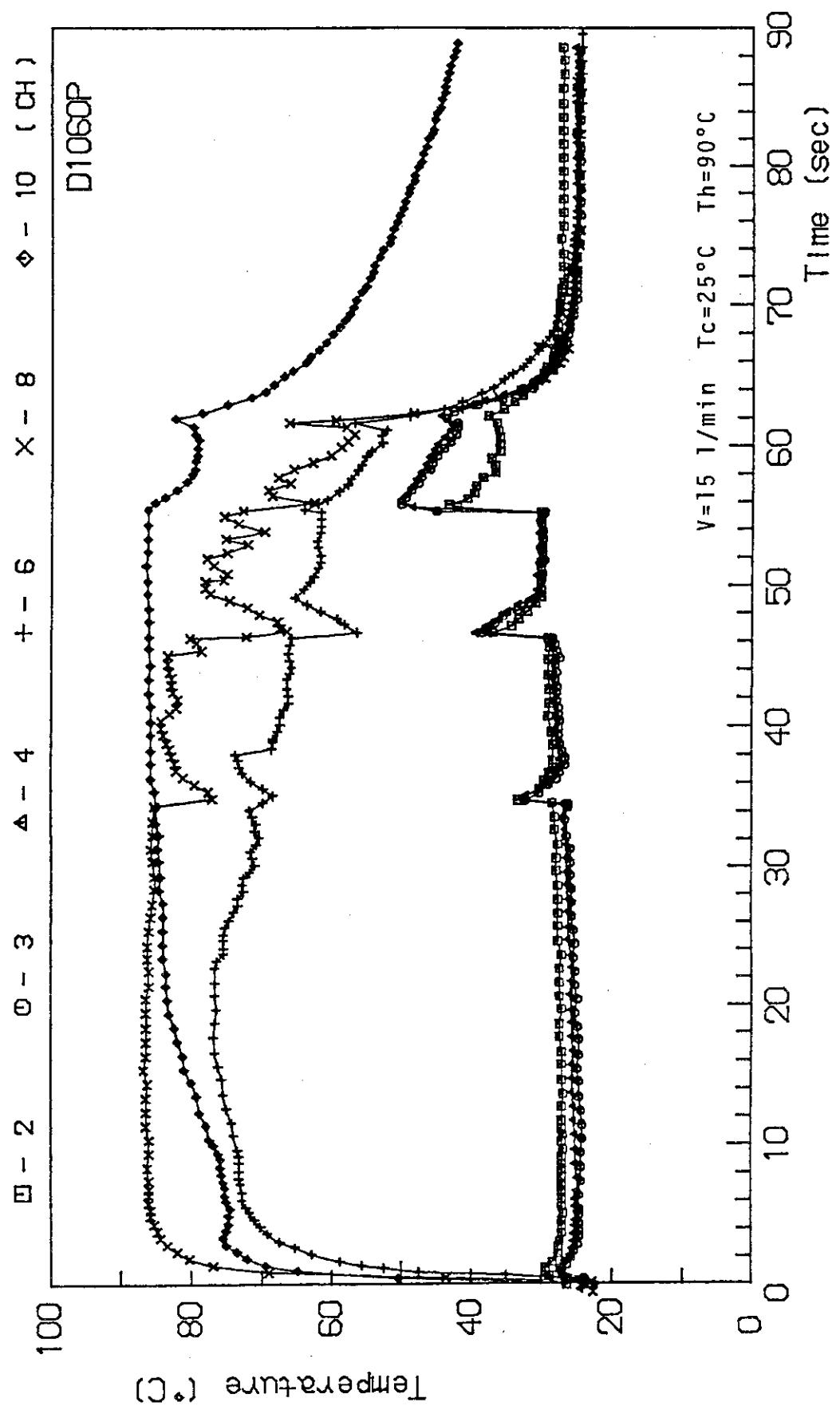


Fig. 3.4(14) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

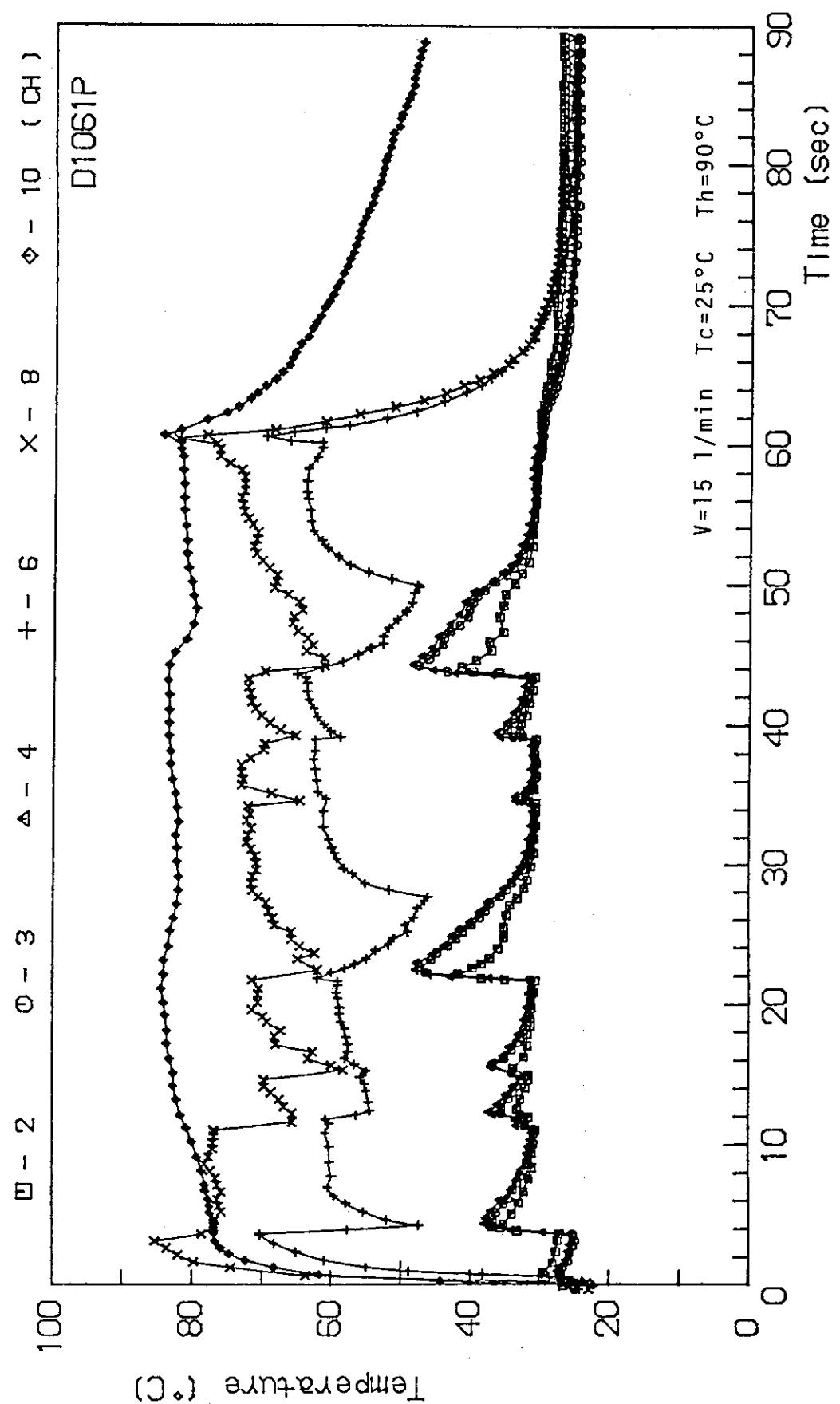


Fig. 3.4(15) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

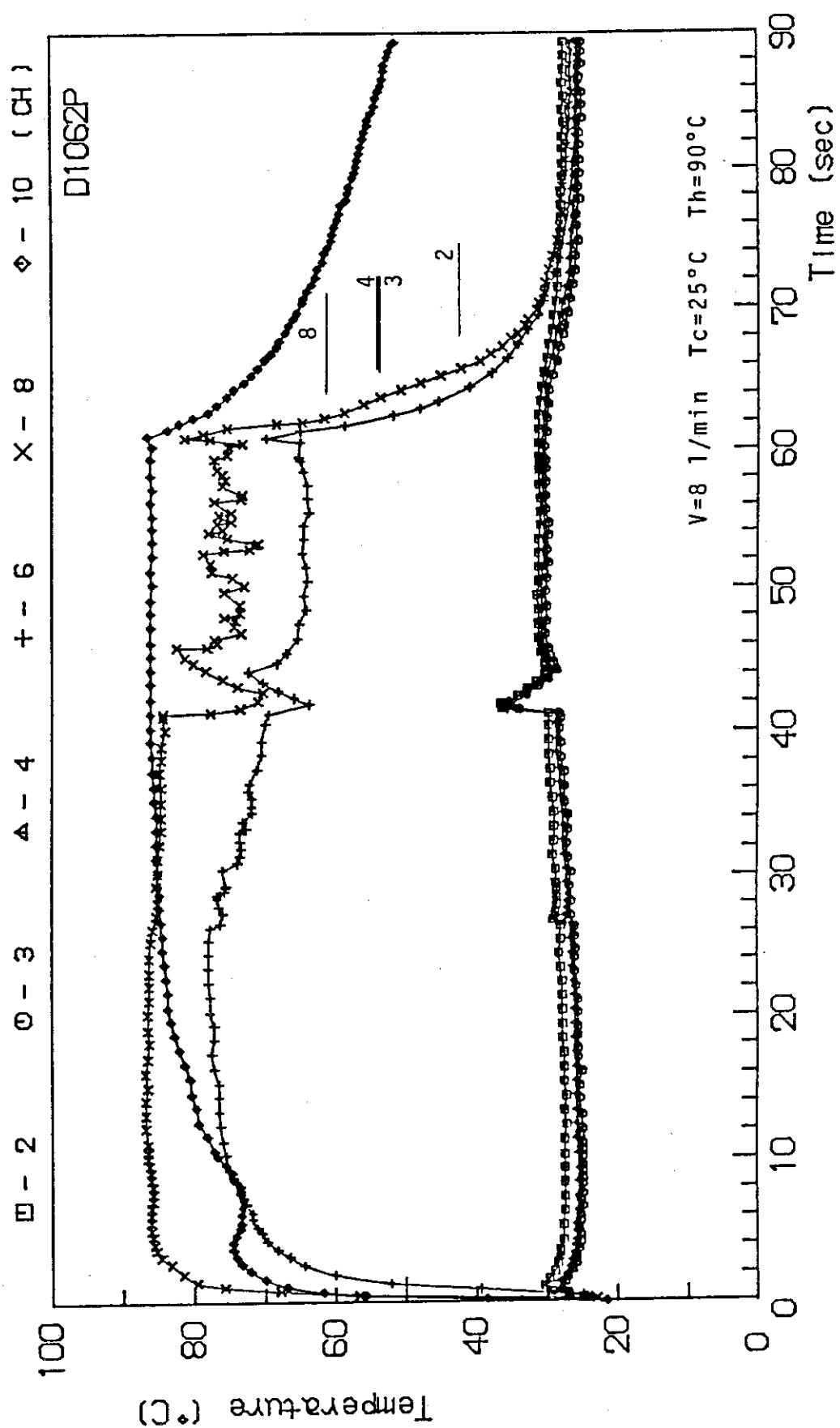


Fig. 3.4(16) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

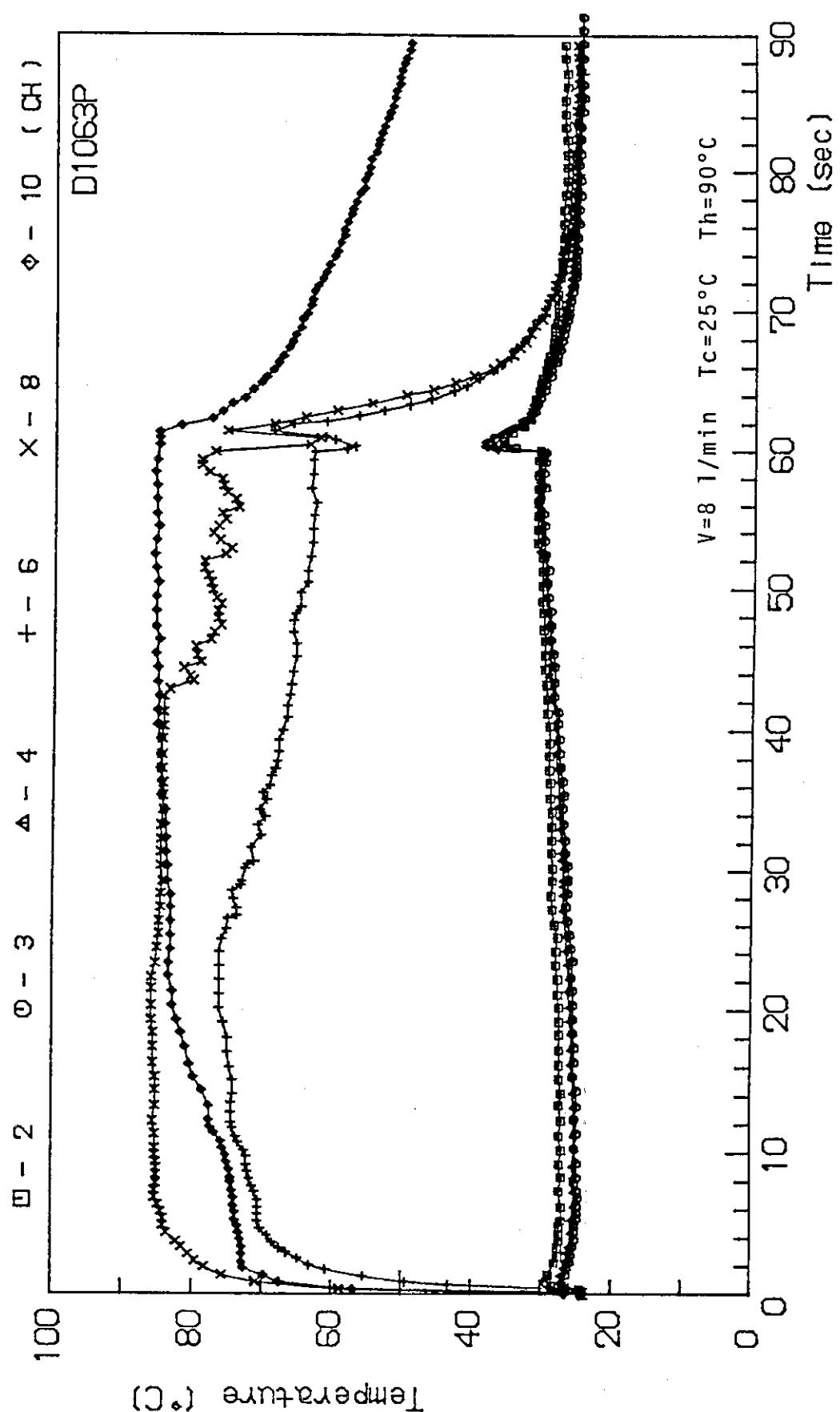


Fig. 3.4(17) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
 (Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
 and Coolant flow rate = 8 l/min)

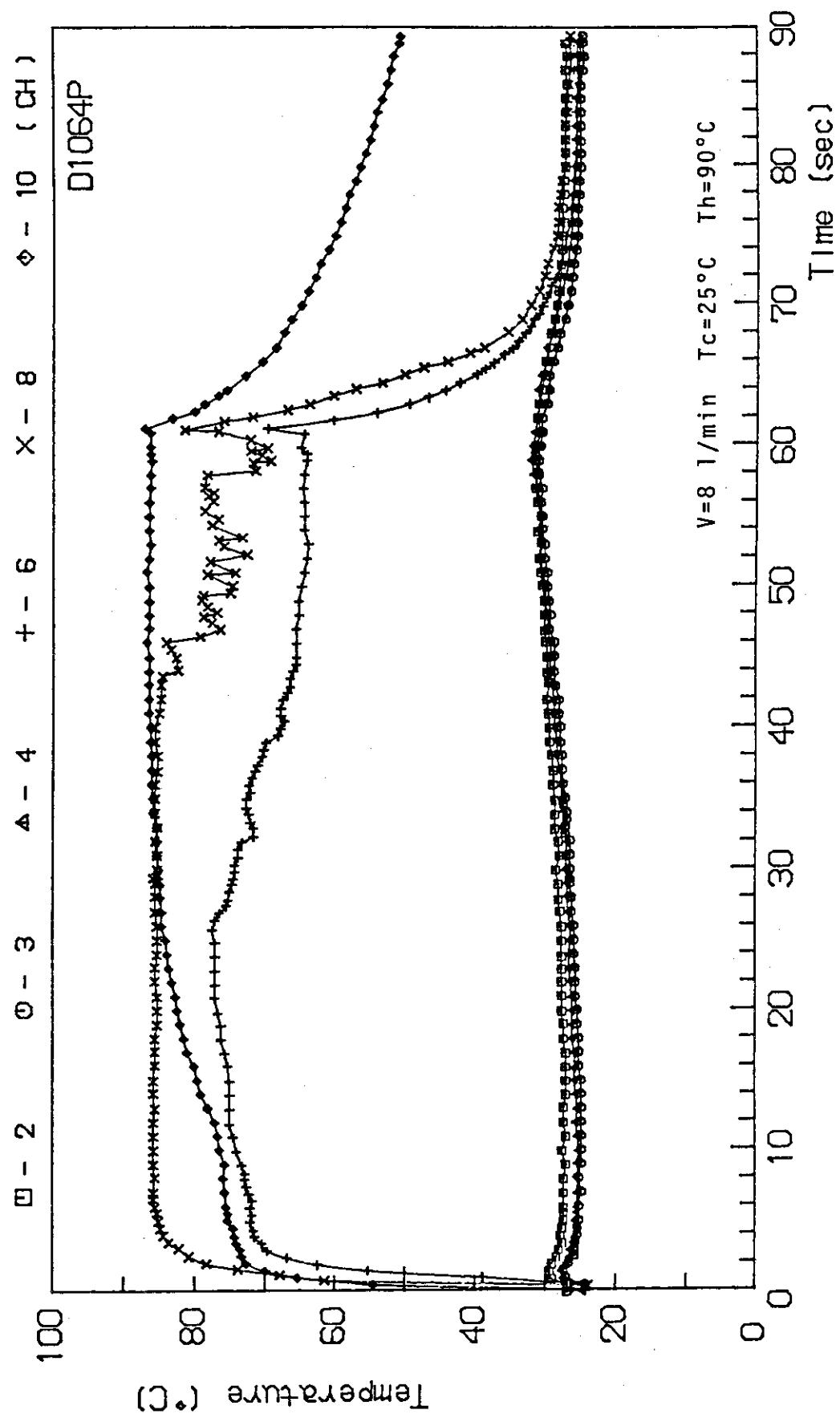


Fig. 3.4(18) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

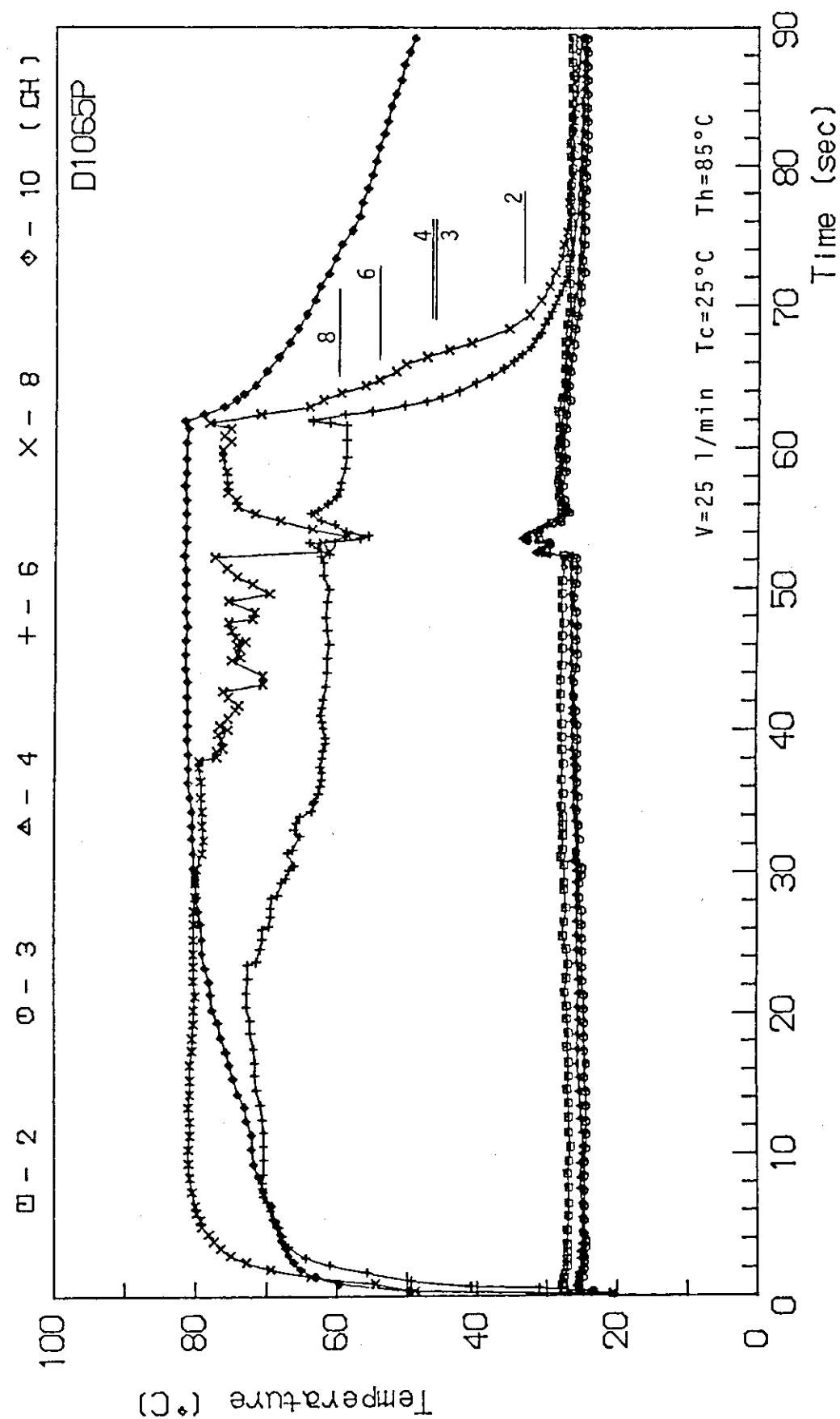


Fig. 3.4(19) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

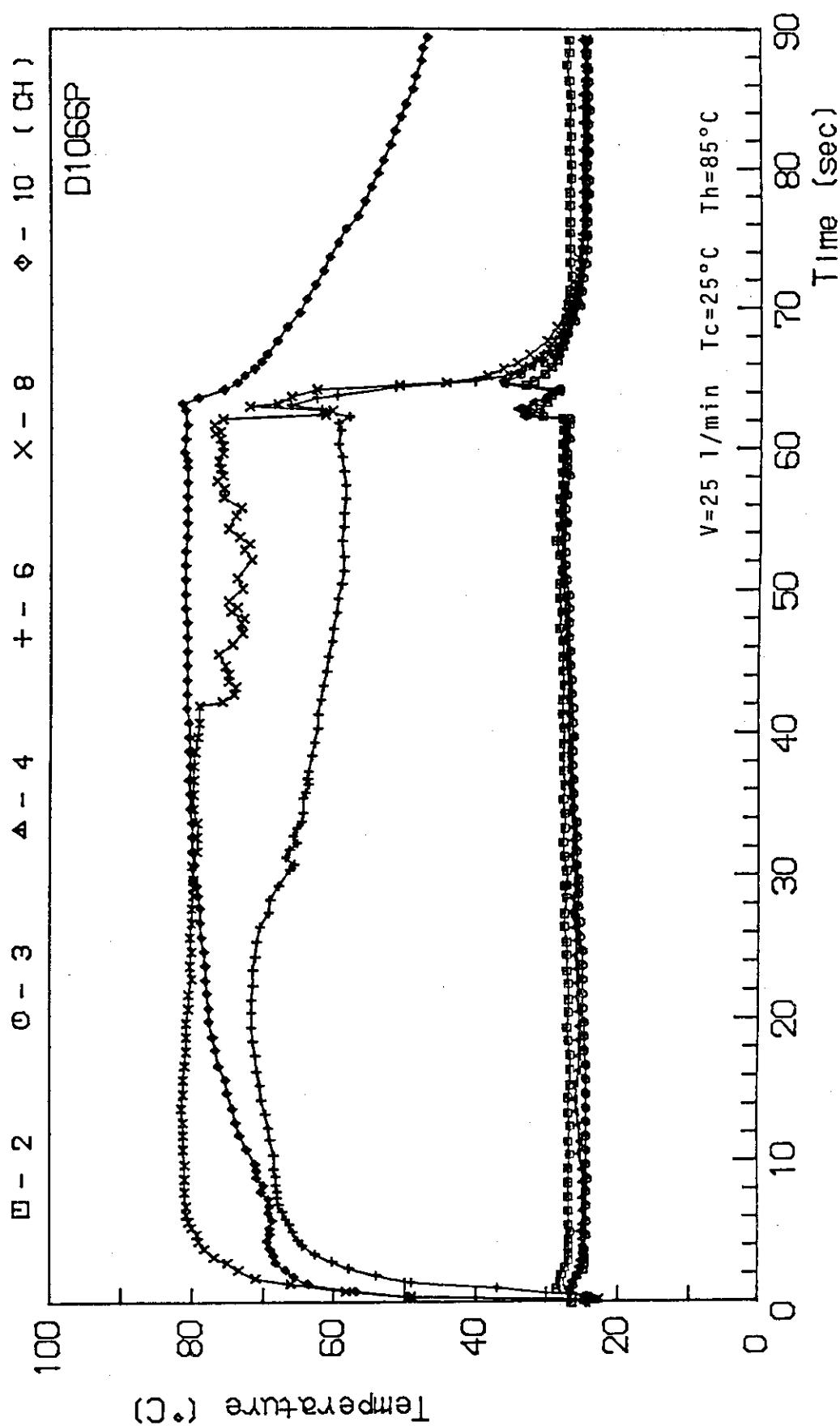


Fig. 3.4(20) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

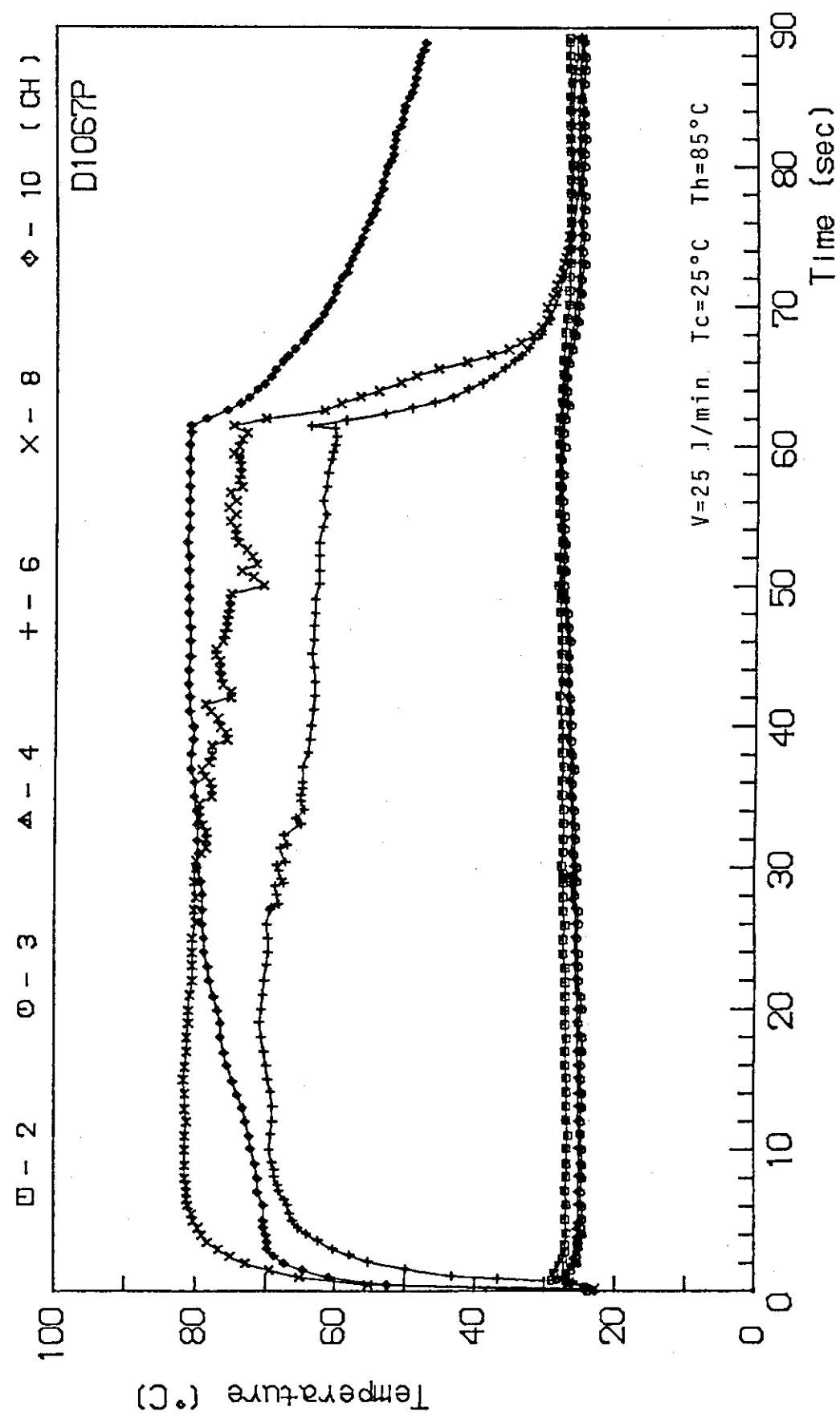


Fig. 3.4(21) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

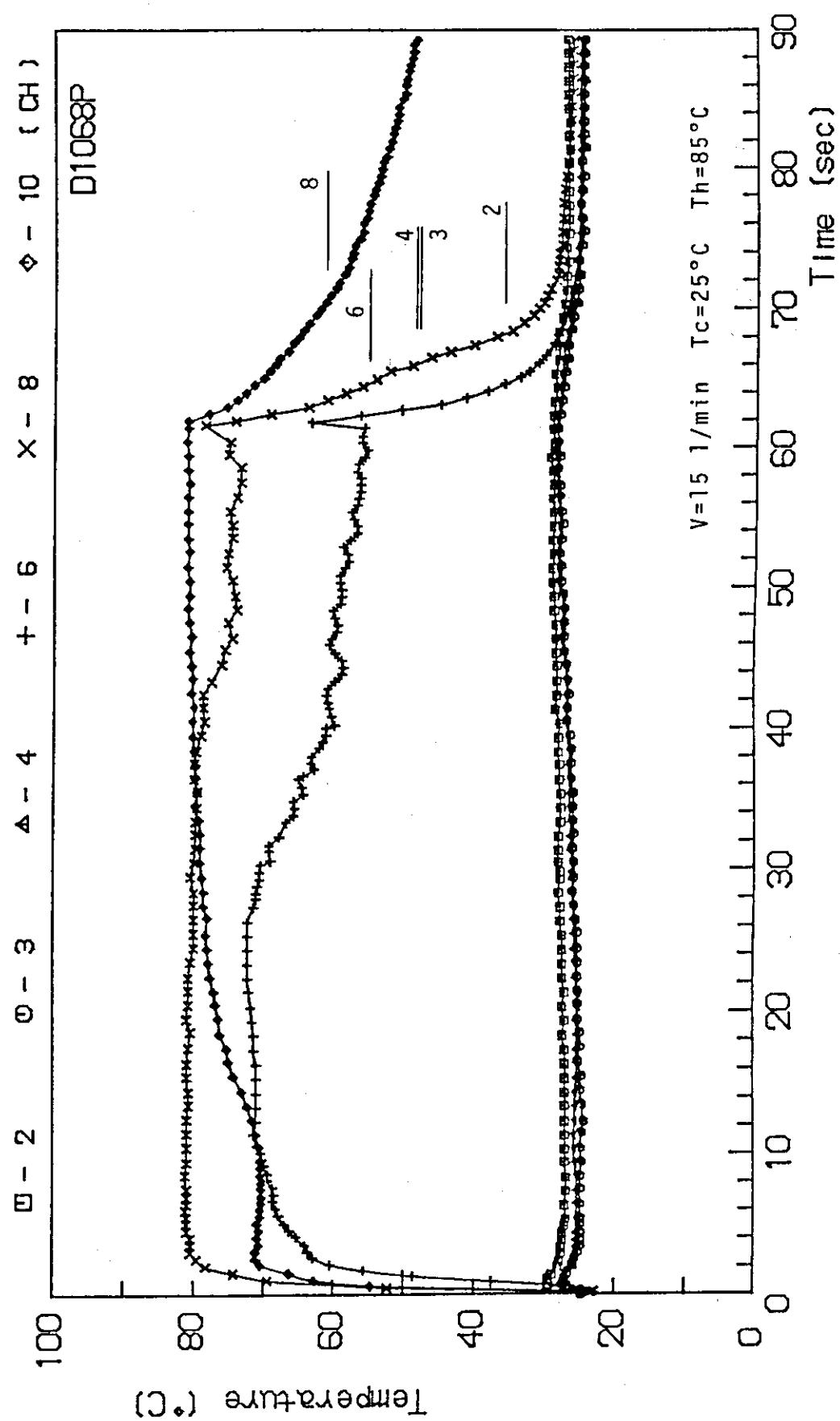


Fig. 3.4(22) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

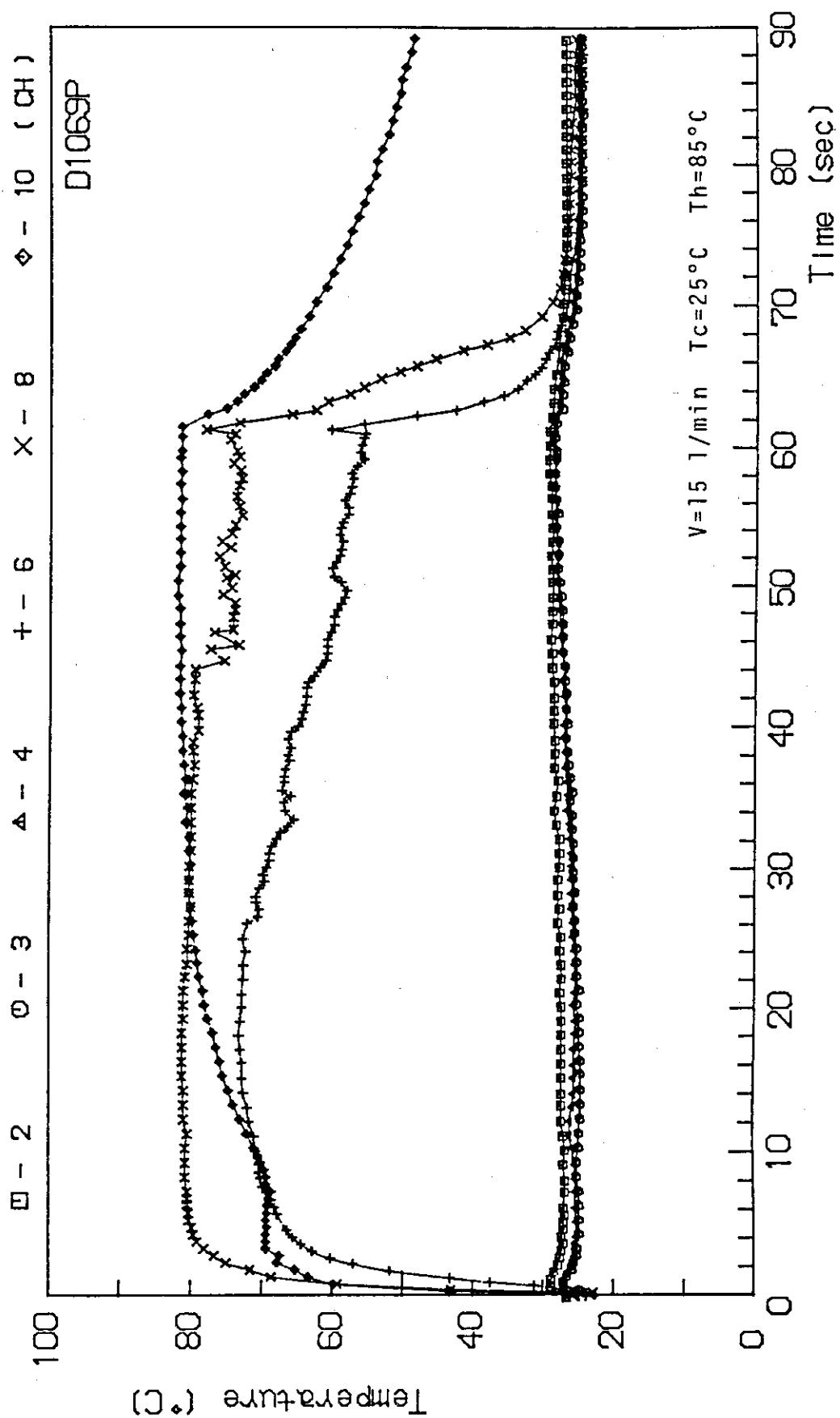


Fig. 3.4(23) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

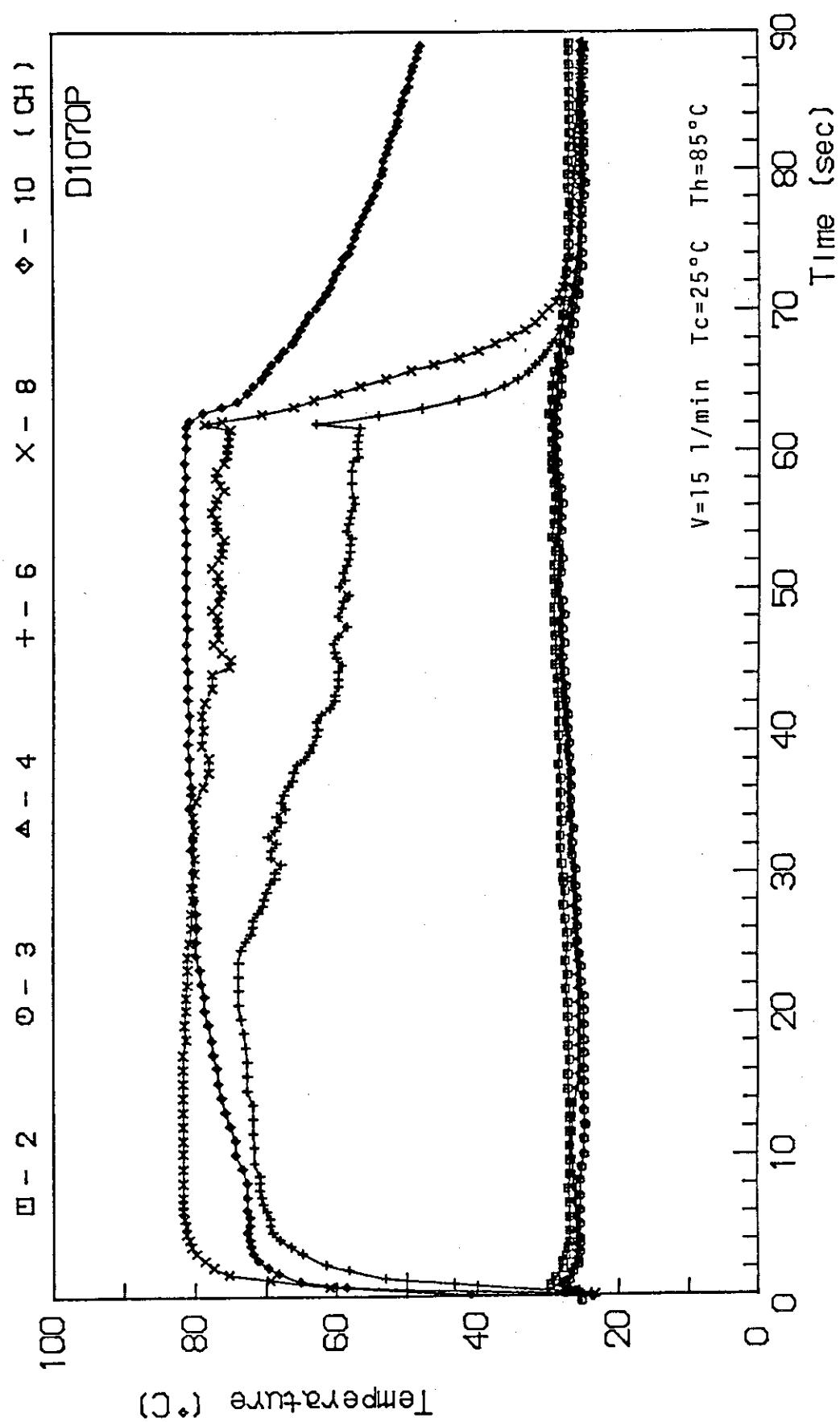


Fig. 3.4(24) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

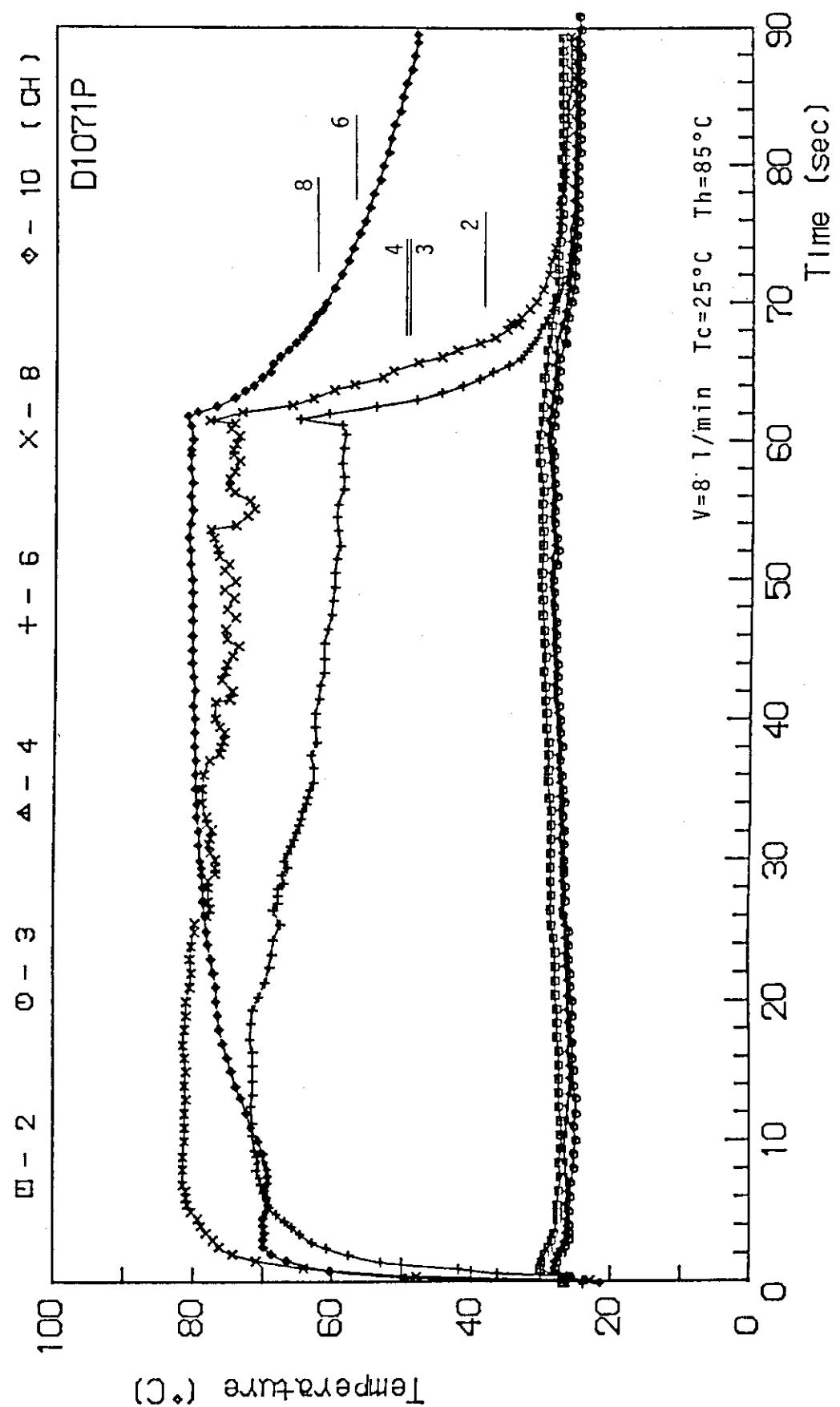


Fig. 3.4(25) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

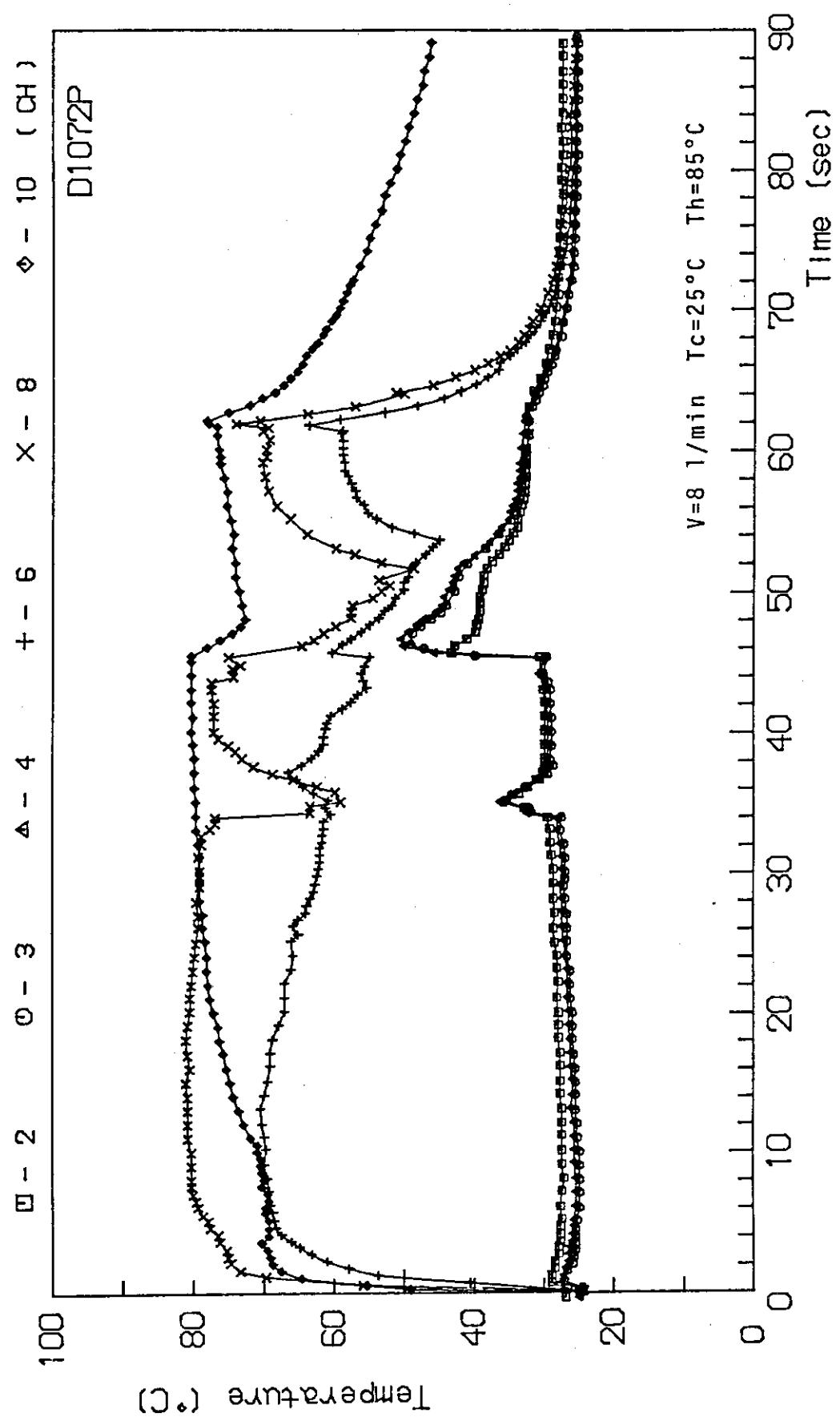


Fig. 3.4(26) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

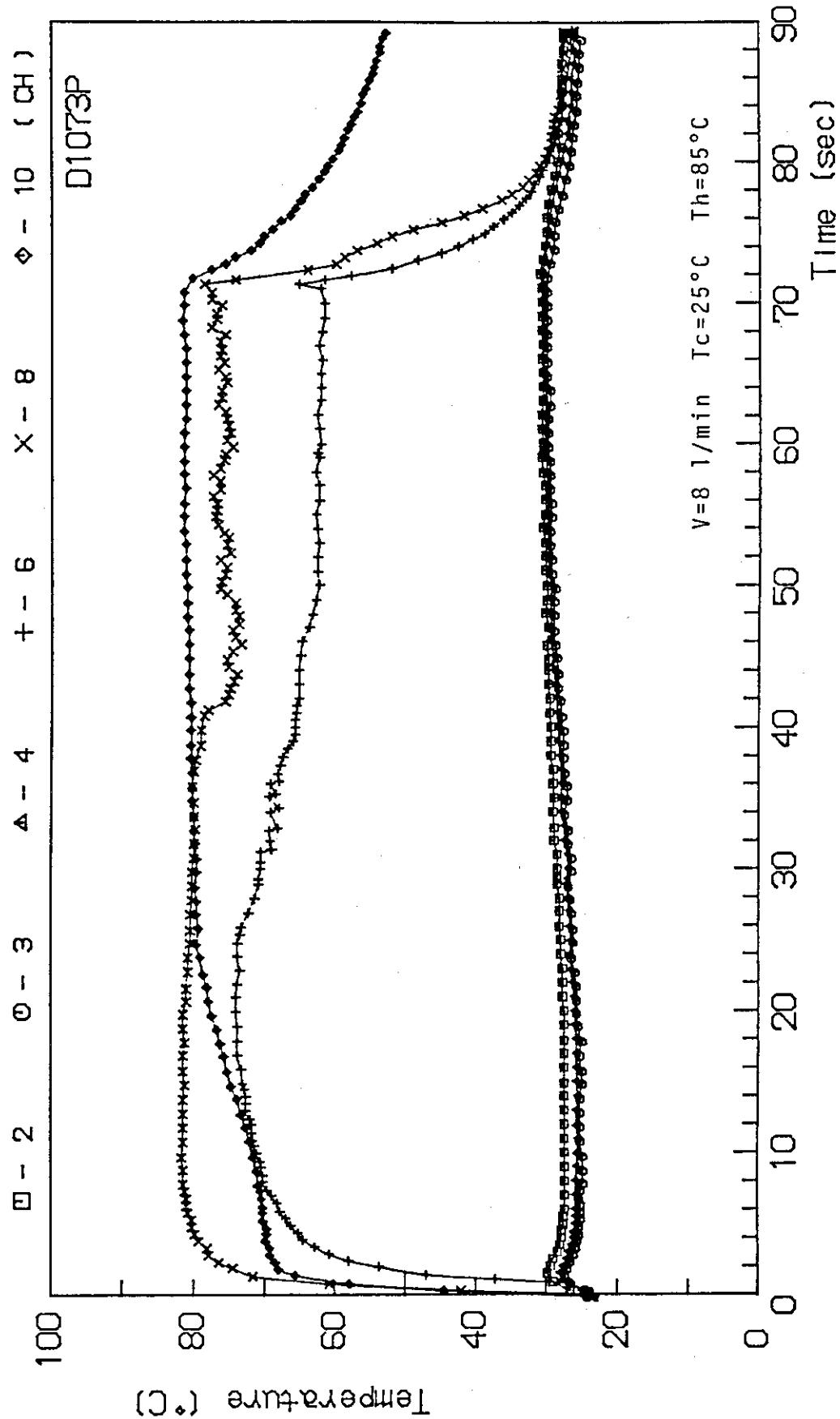


Fig. 3.4(27) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

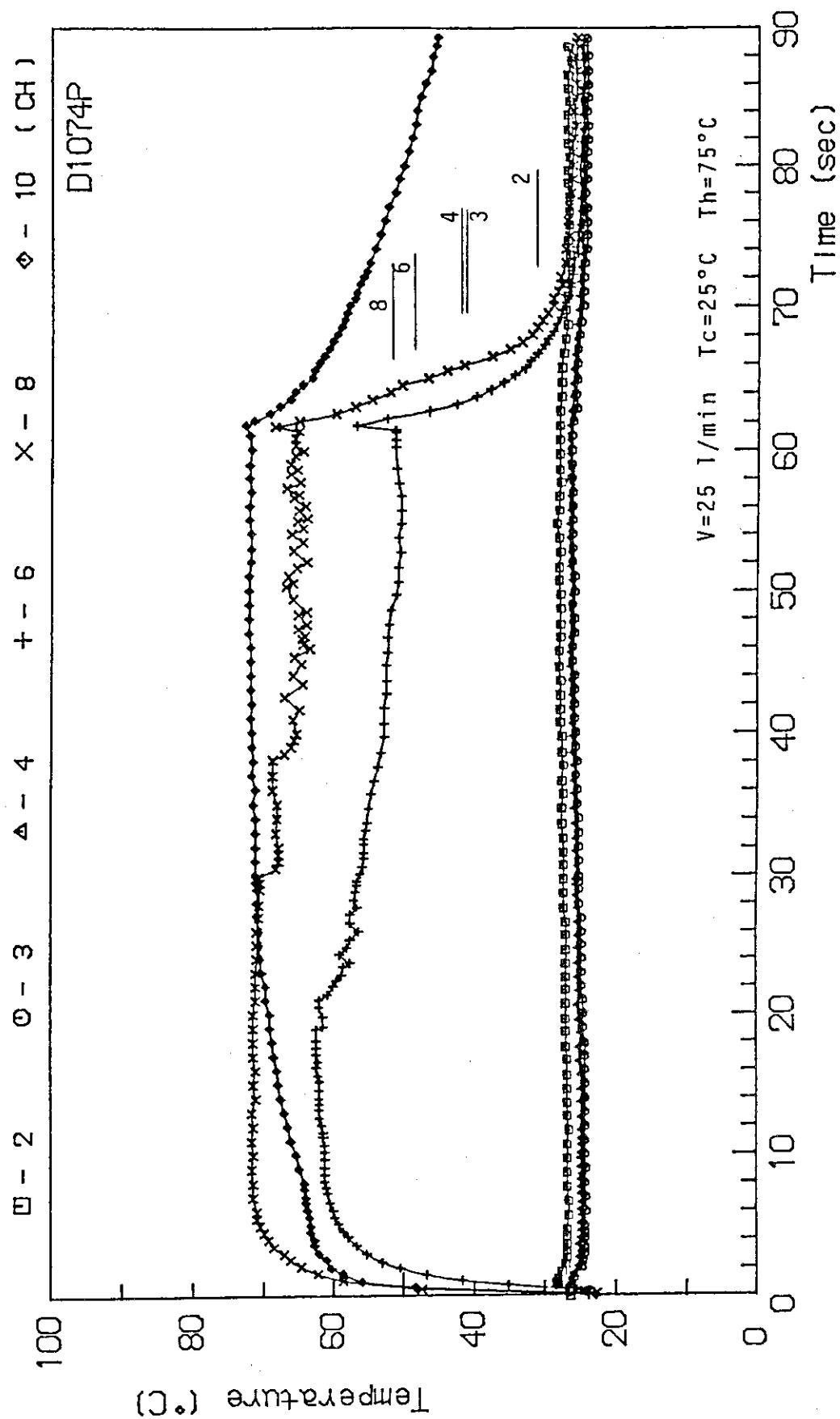


Fig. 3.4(28) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

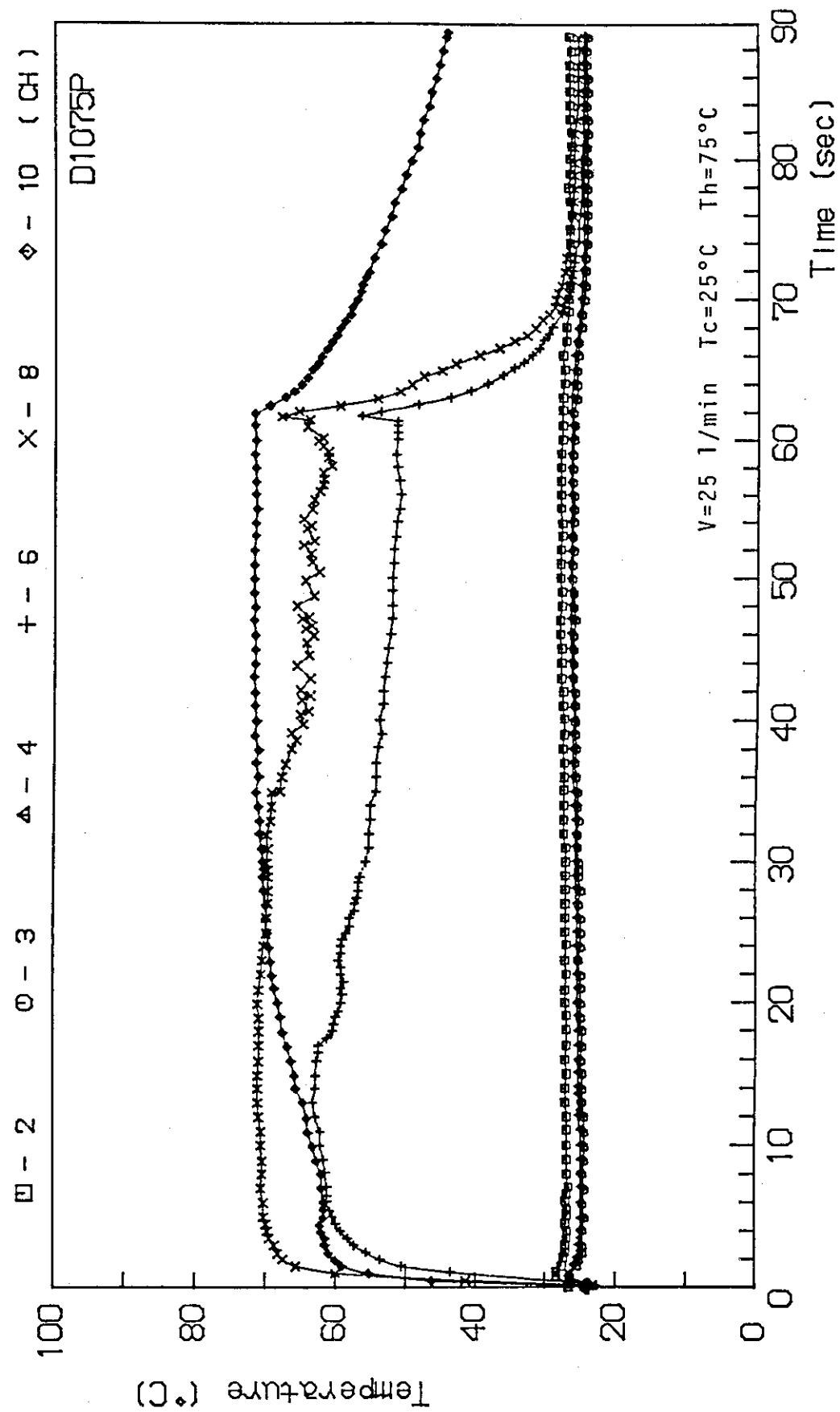


Fig. 3.4(29) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

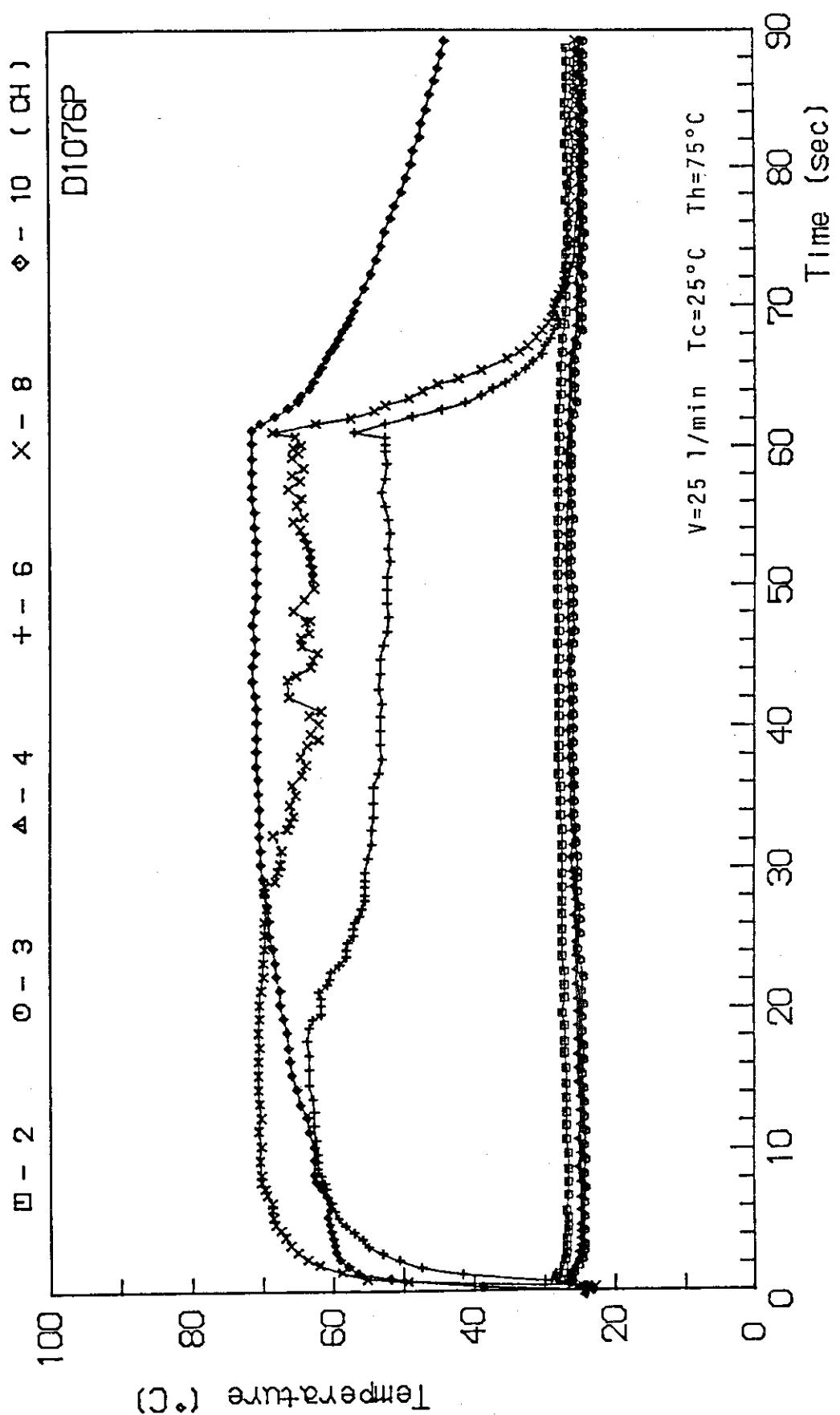


Fig. 3.4(30) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

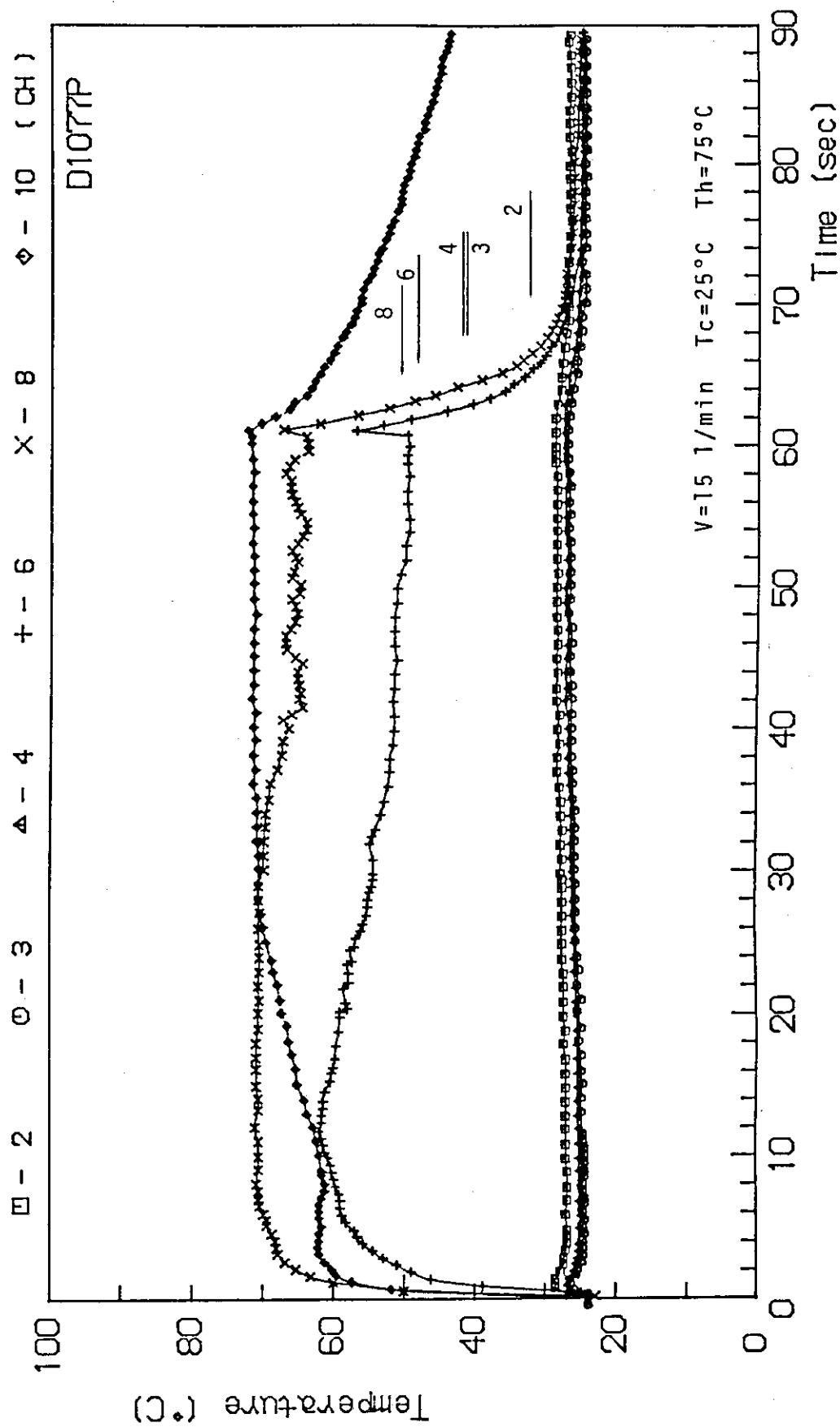


Fig. 3.4(31) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

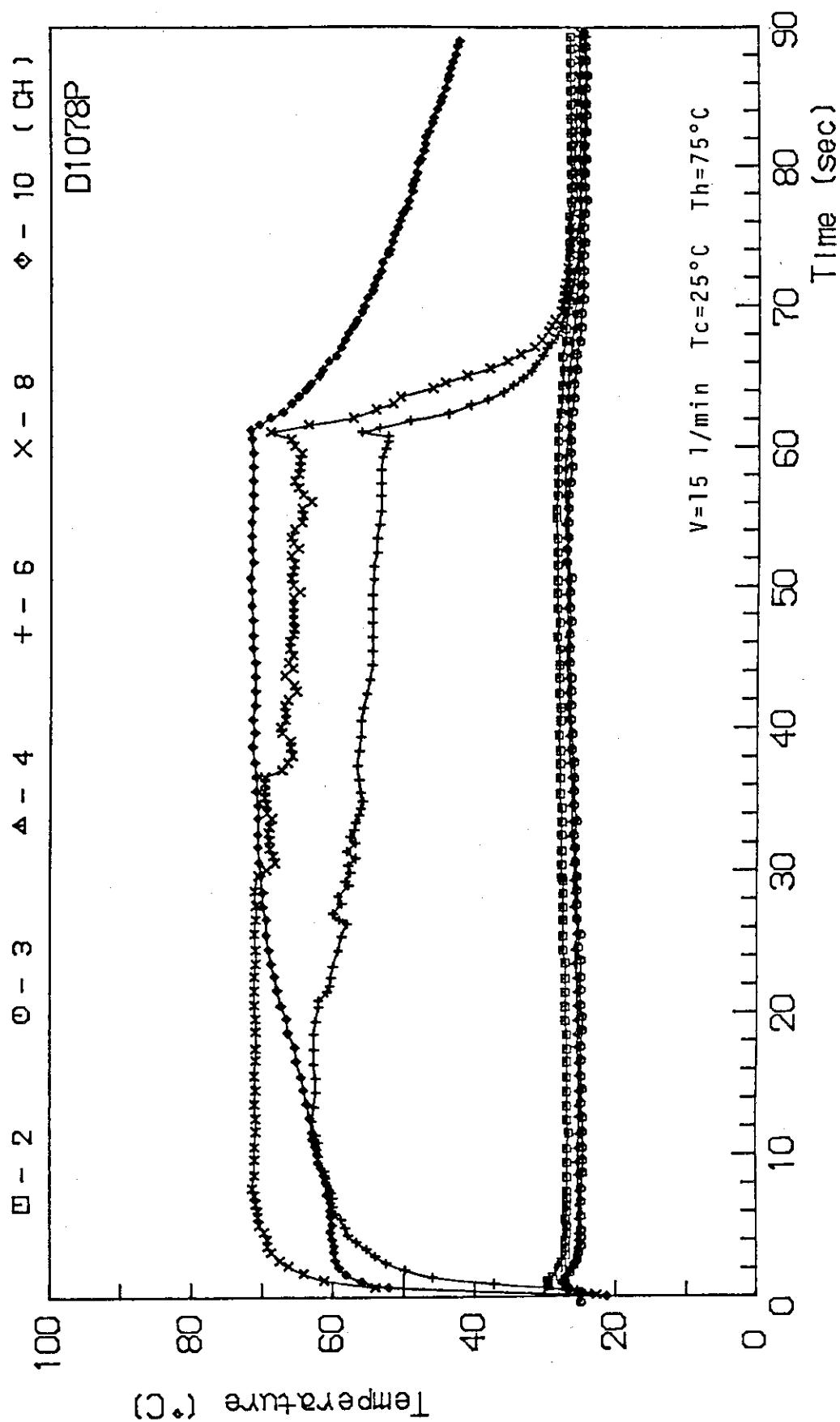


Fig. 3.4(32) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

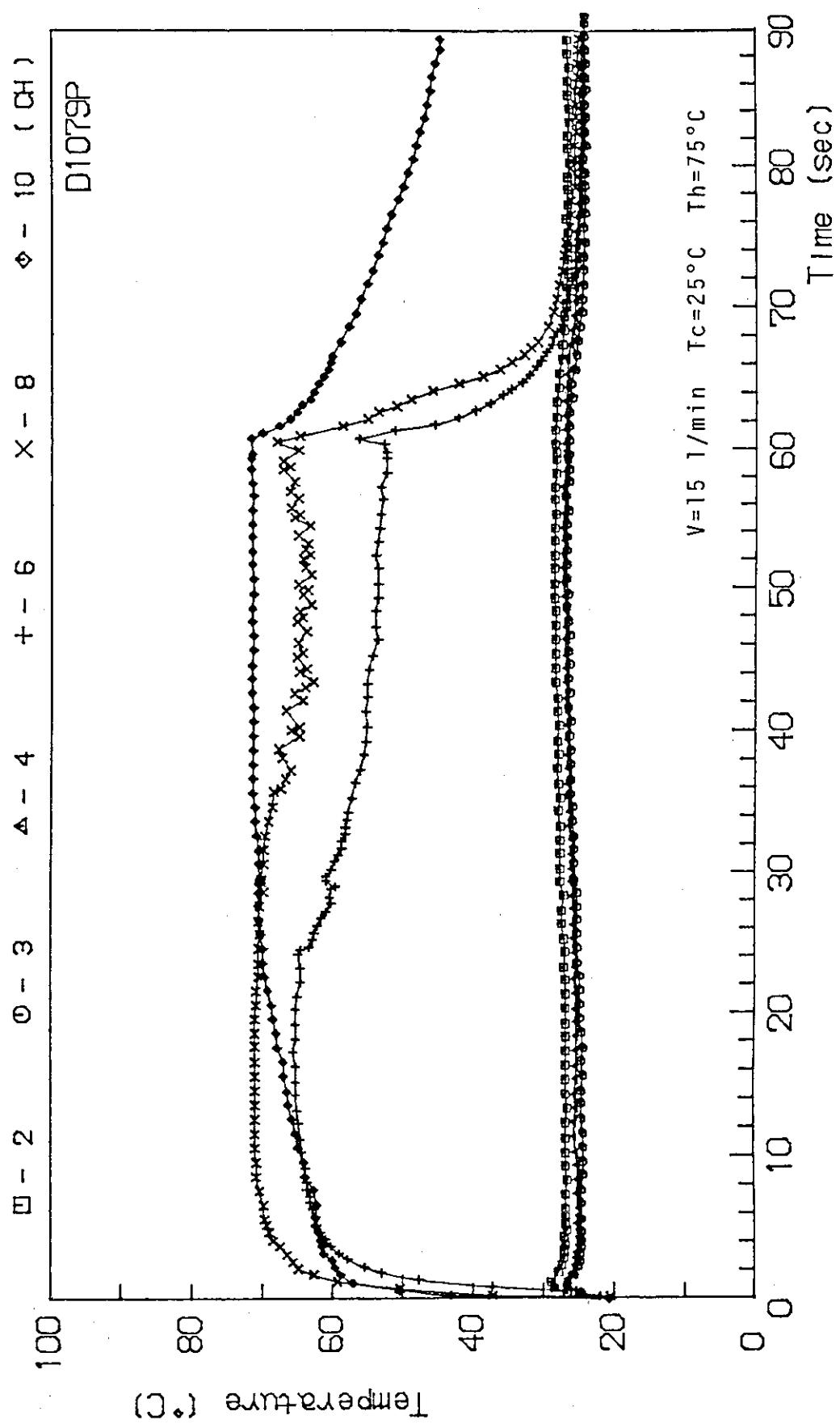


Fig. 3.4(33) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

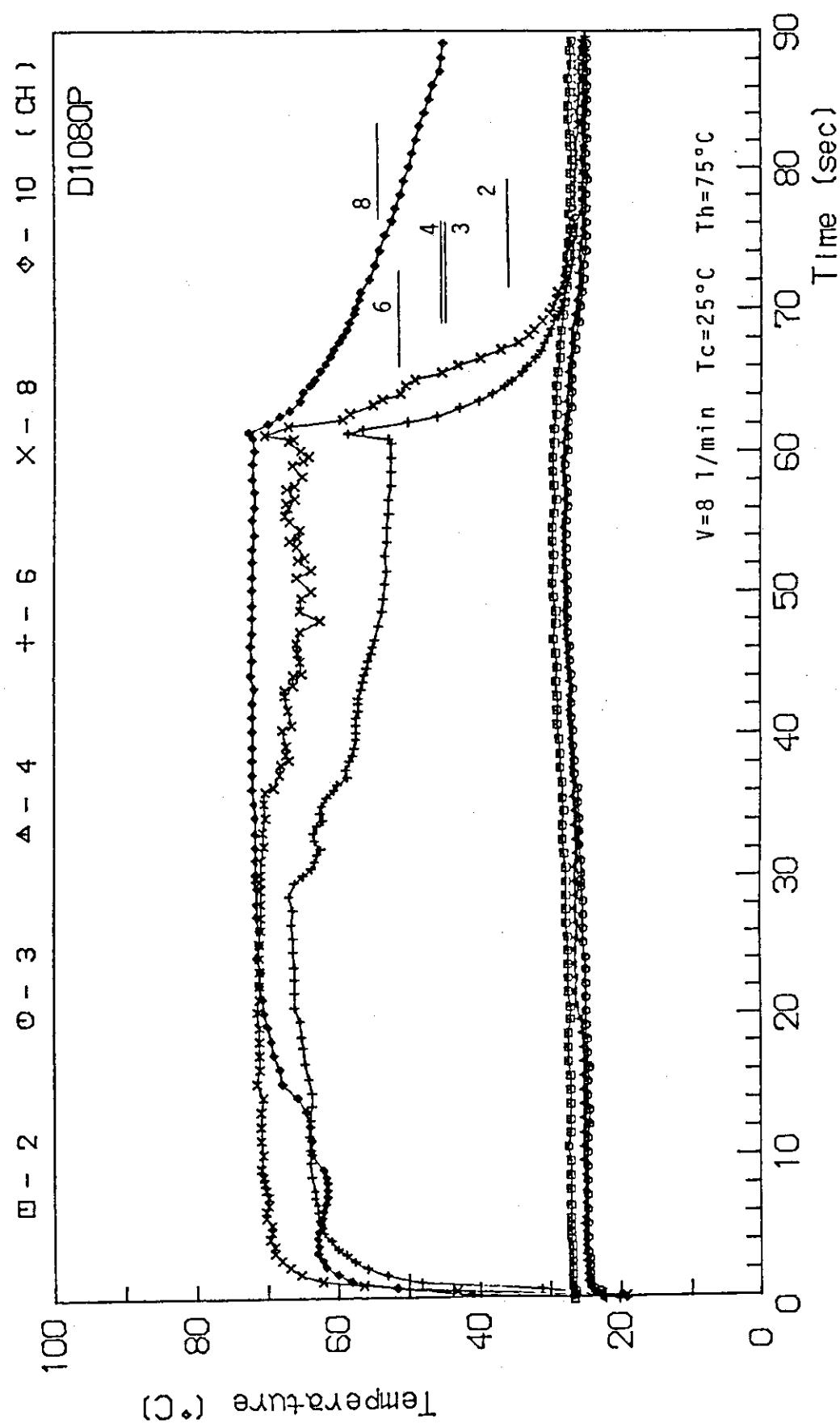


Fig. 3.4(34) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

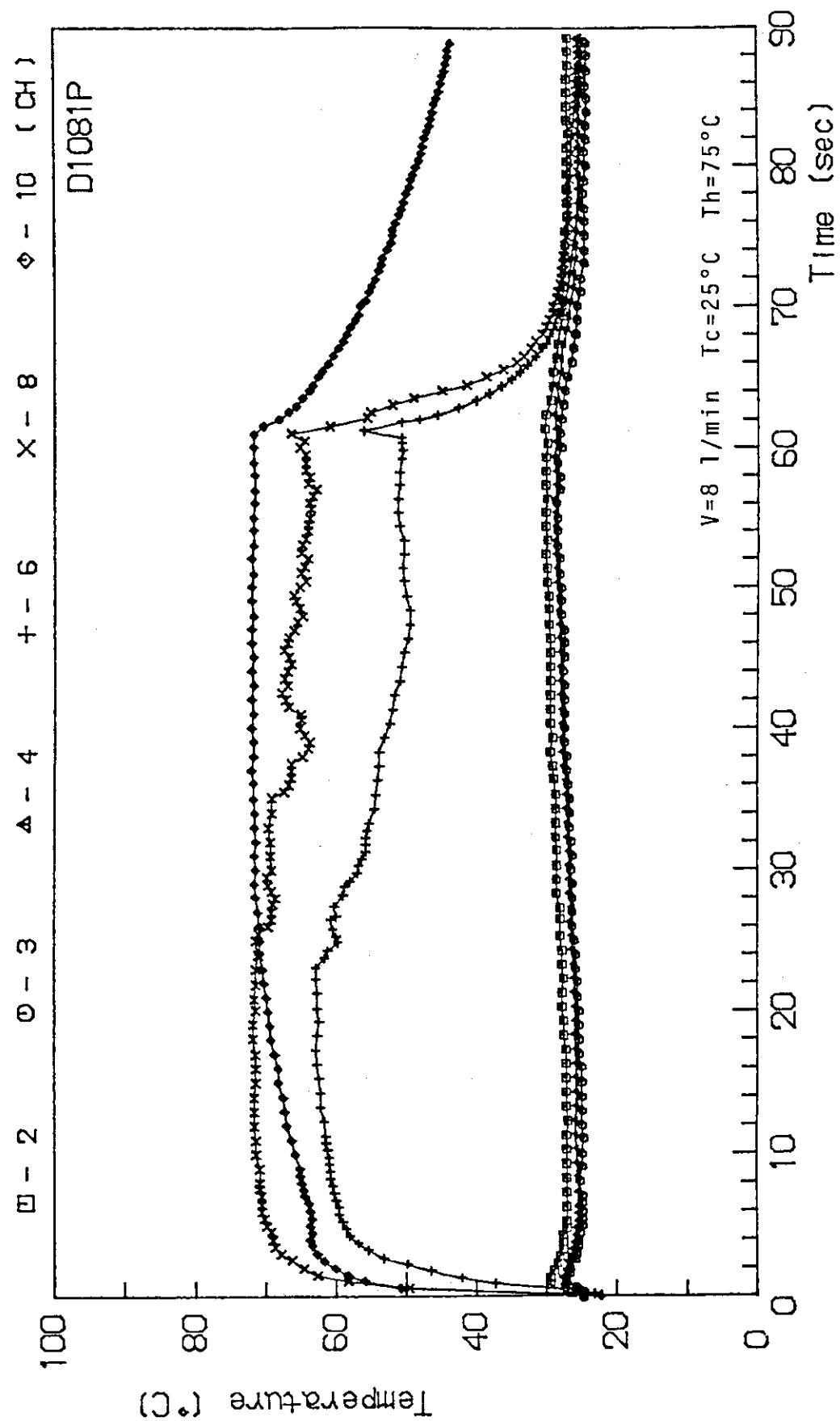


Fig. 3.4(35) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 75°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

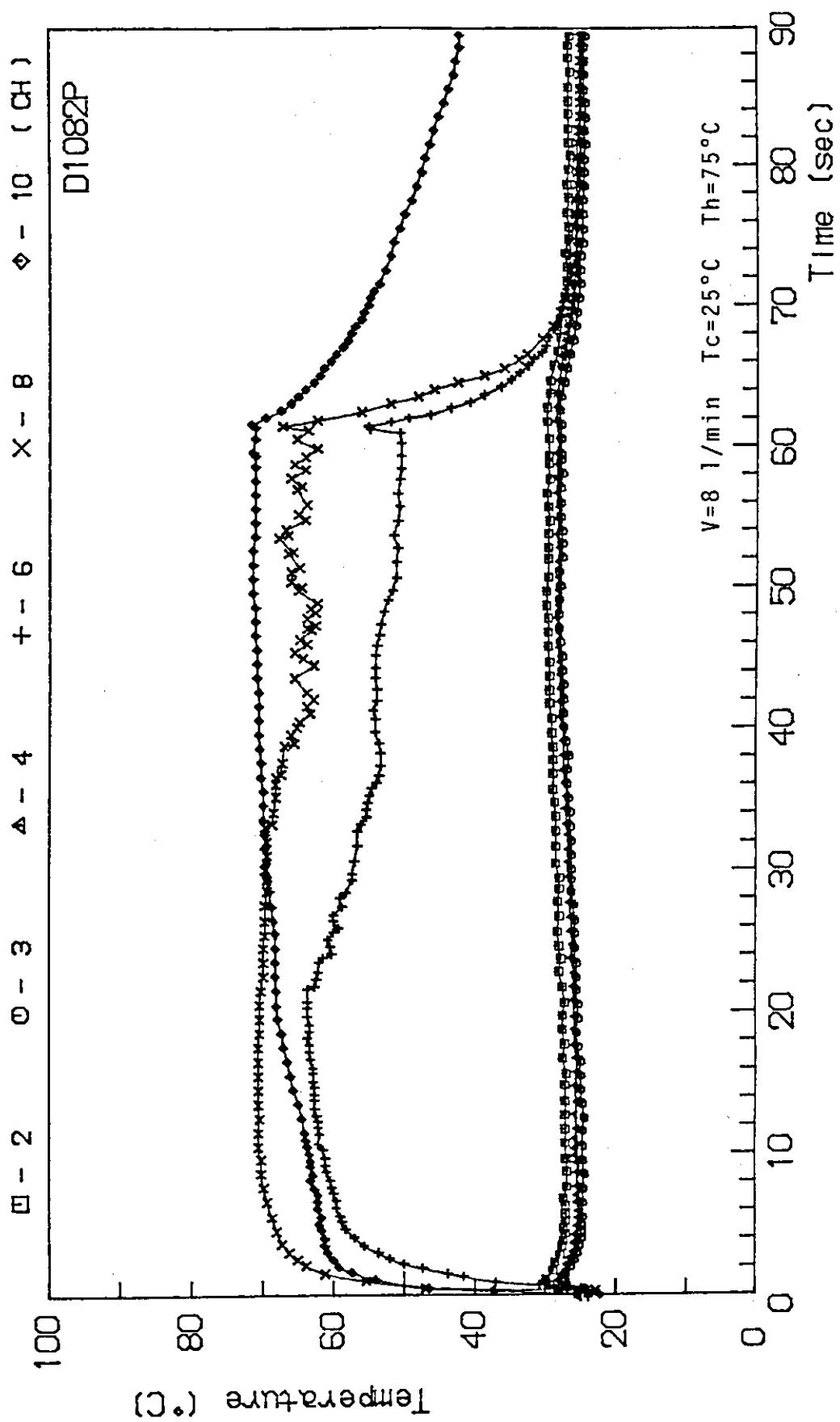


Fig. 3.4(36) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

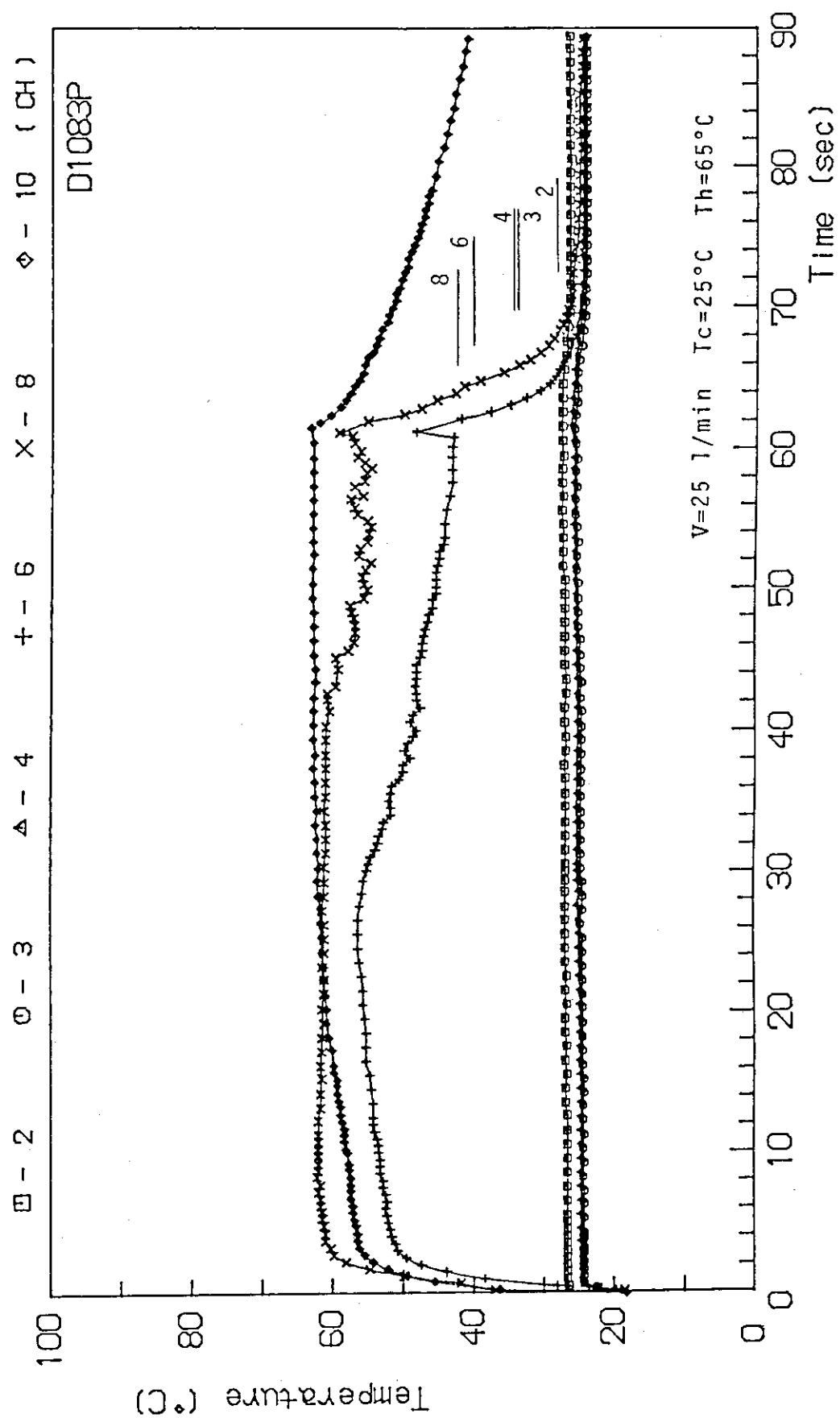


Fig. 3.4(37) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

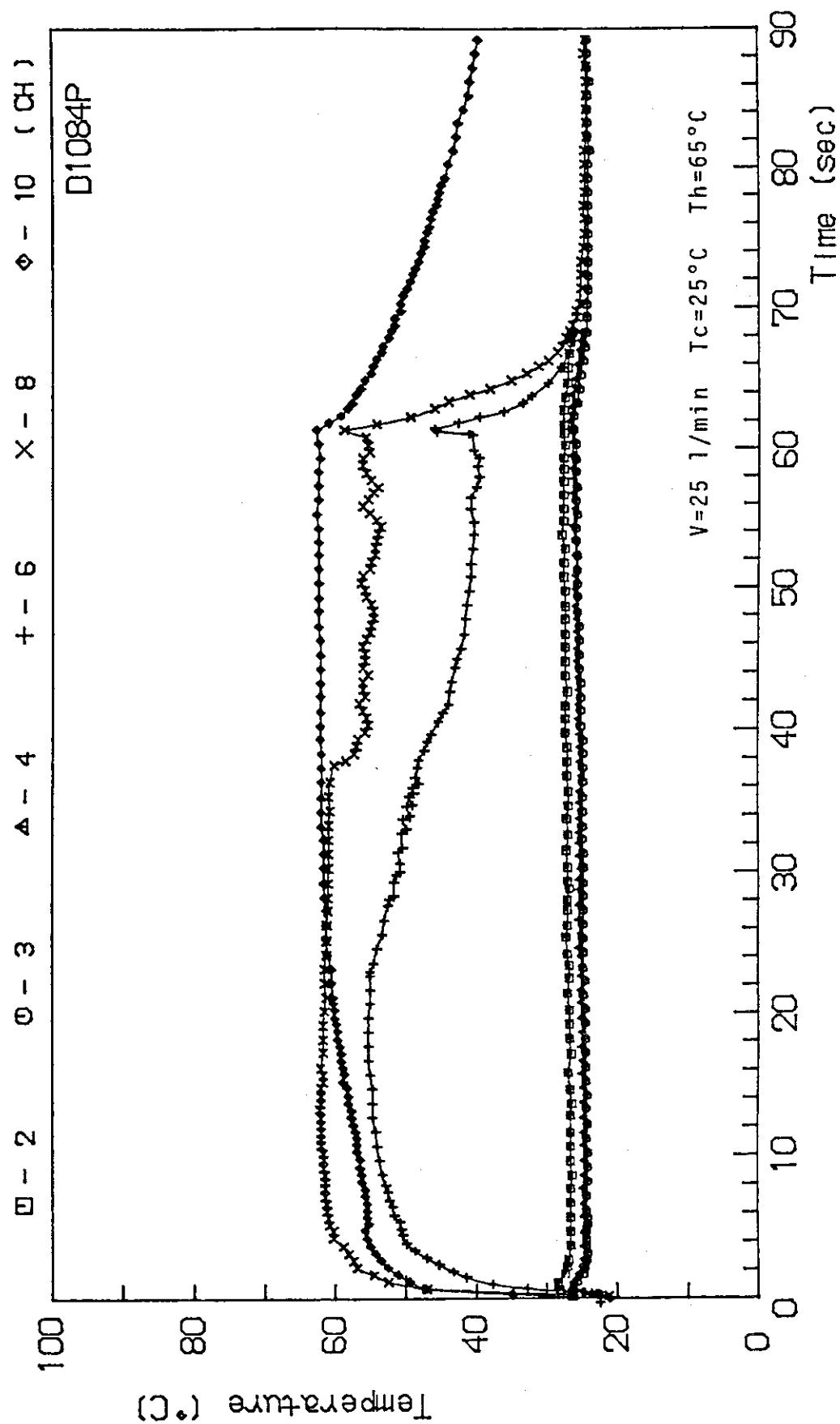


Fig. 3.4(38) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

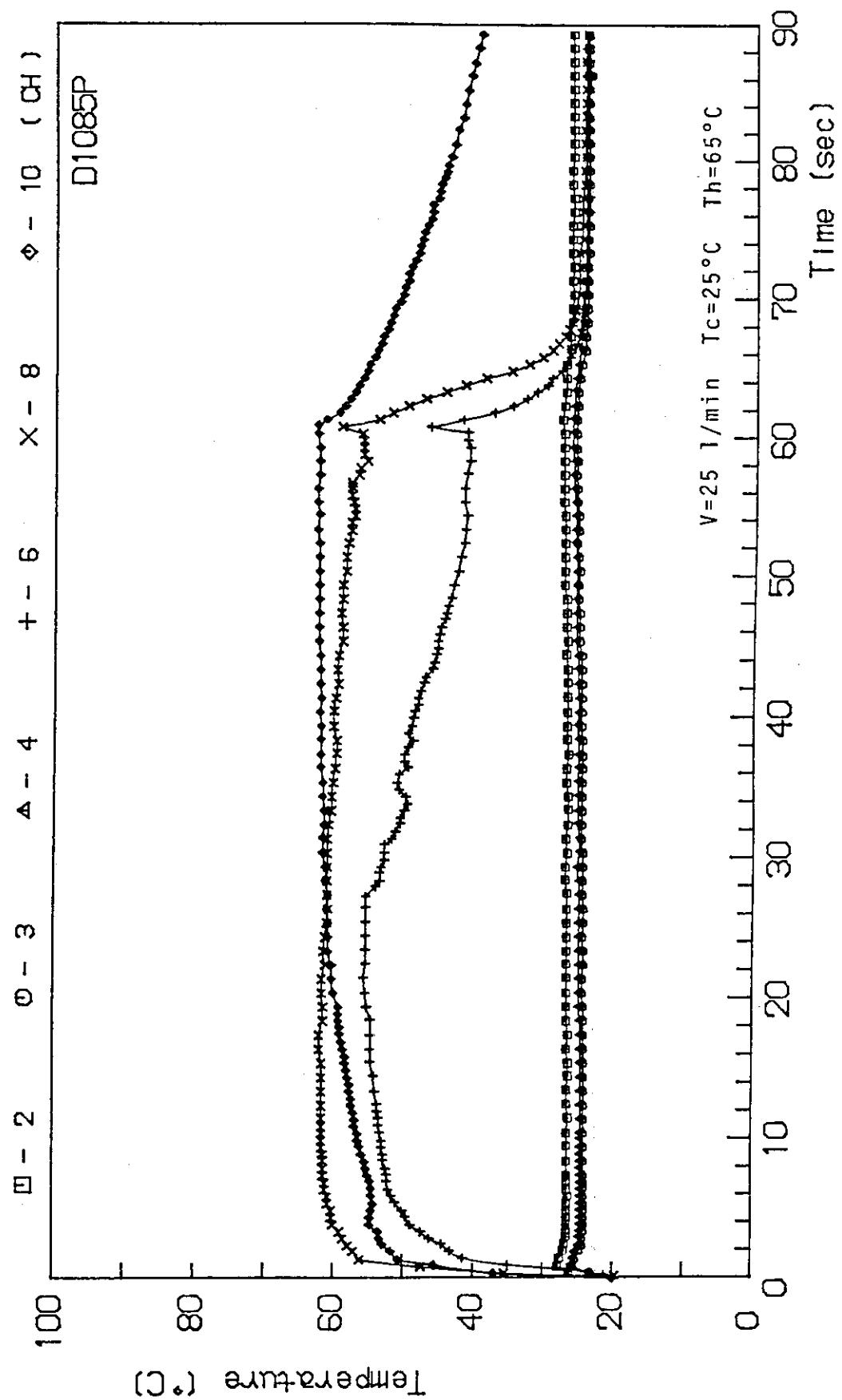


Fig. 3.4(39) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

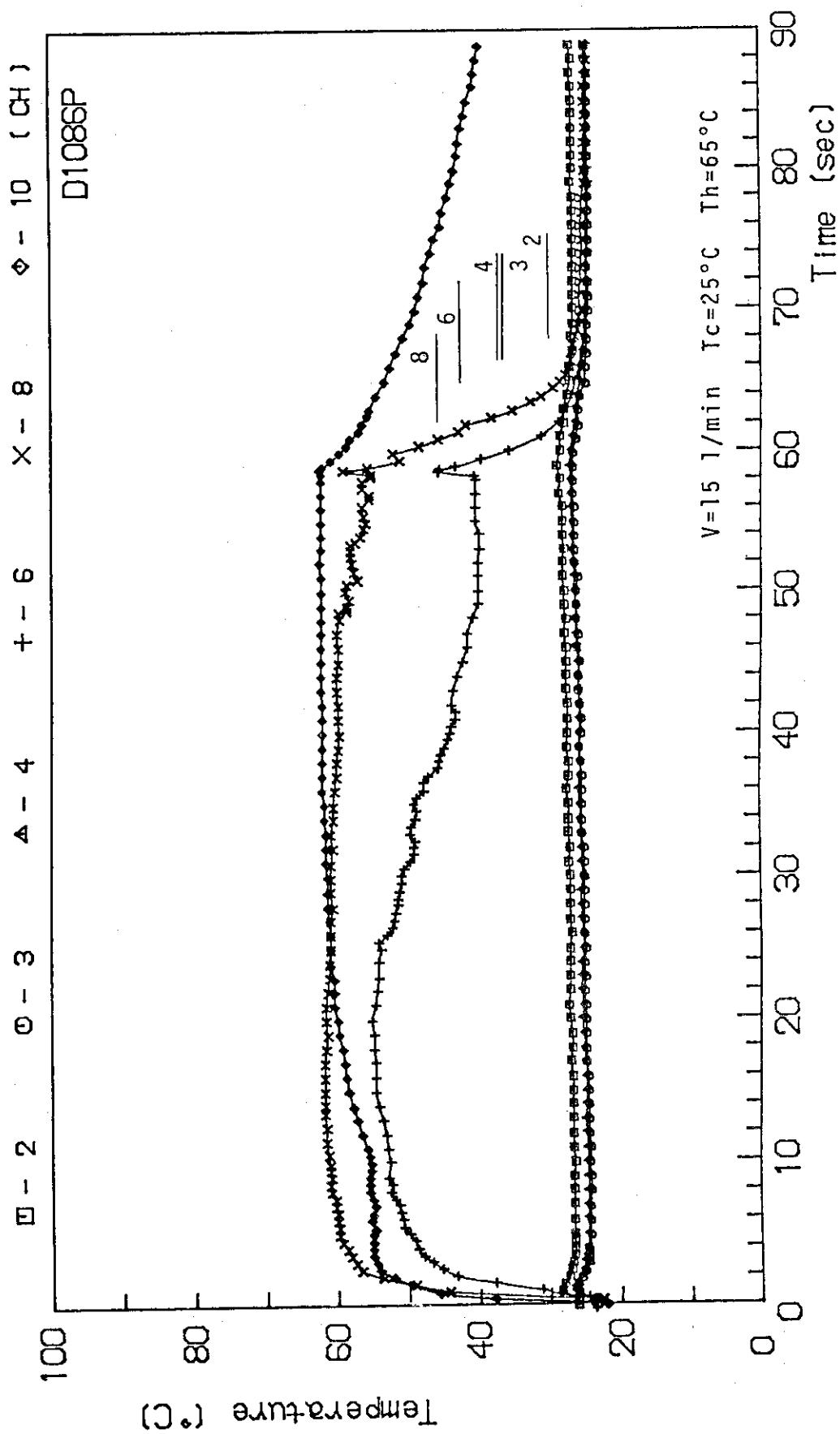


Fig. 3.4(40) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

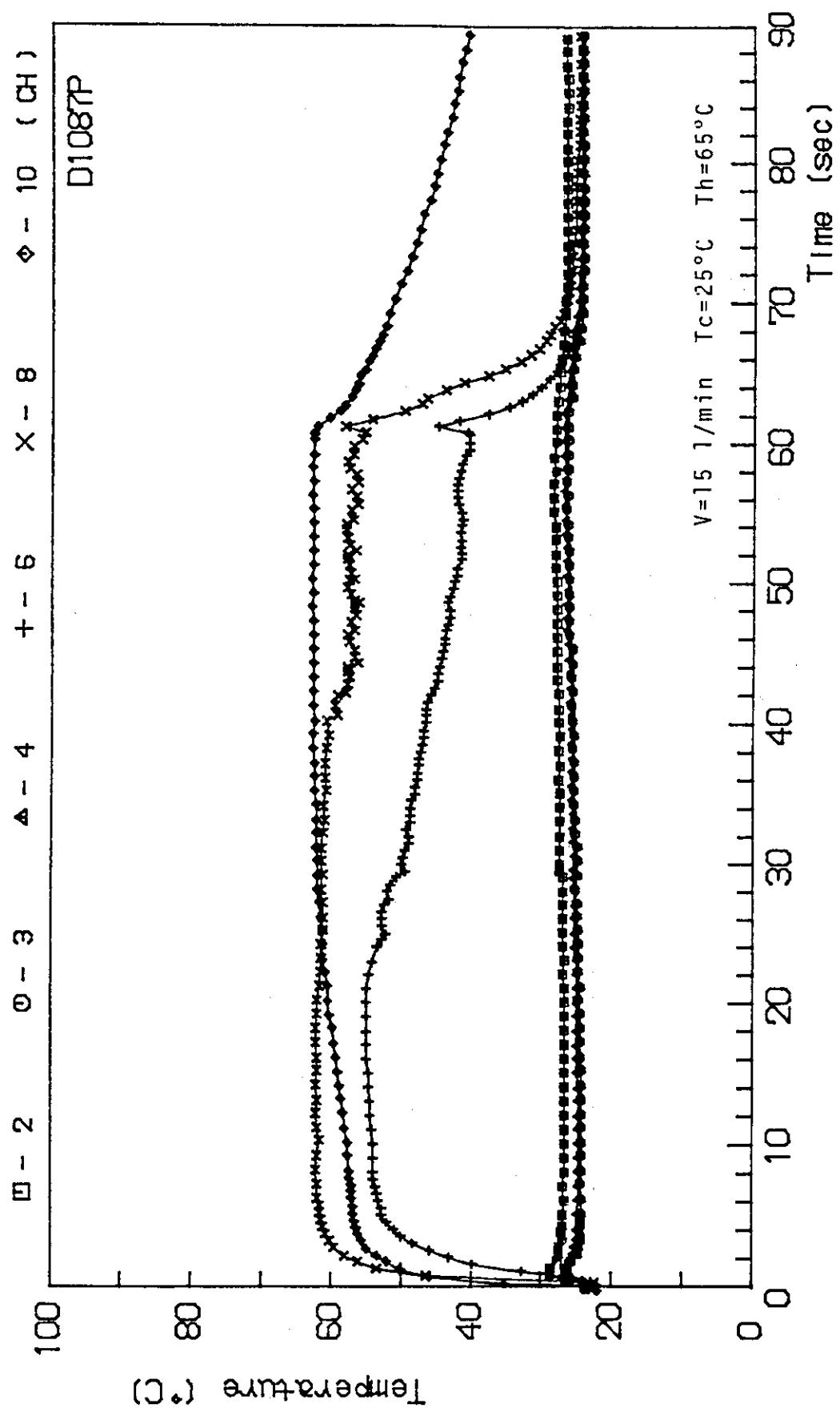


Fig. 3.4(41) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

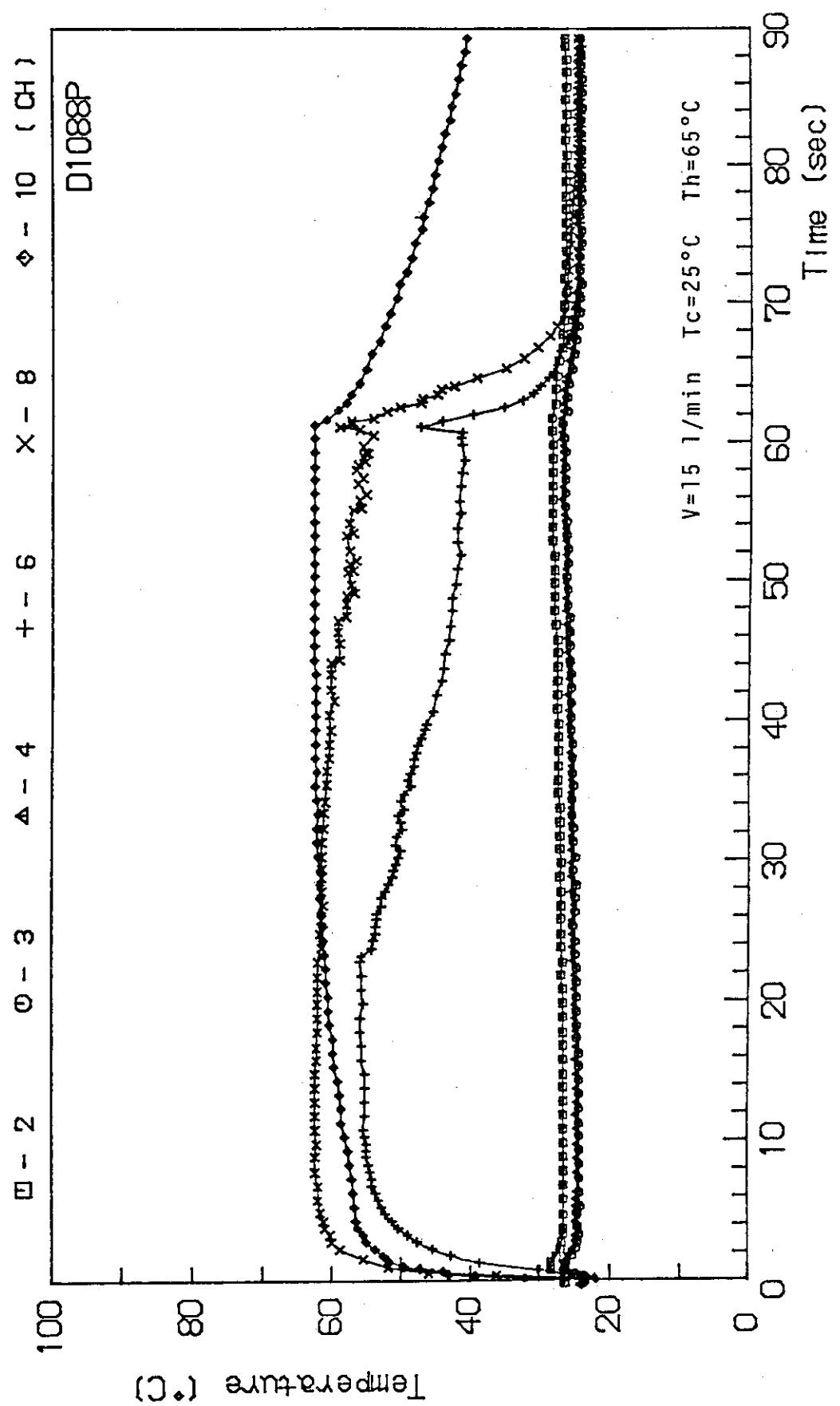


Fig. 3.4(42) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65 °C, Coolant temp. = 25 °C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

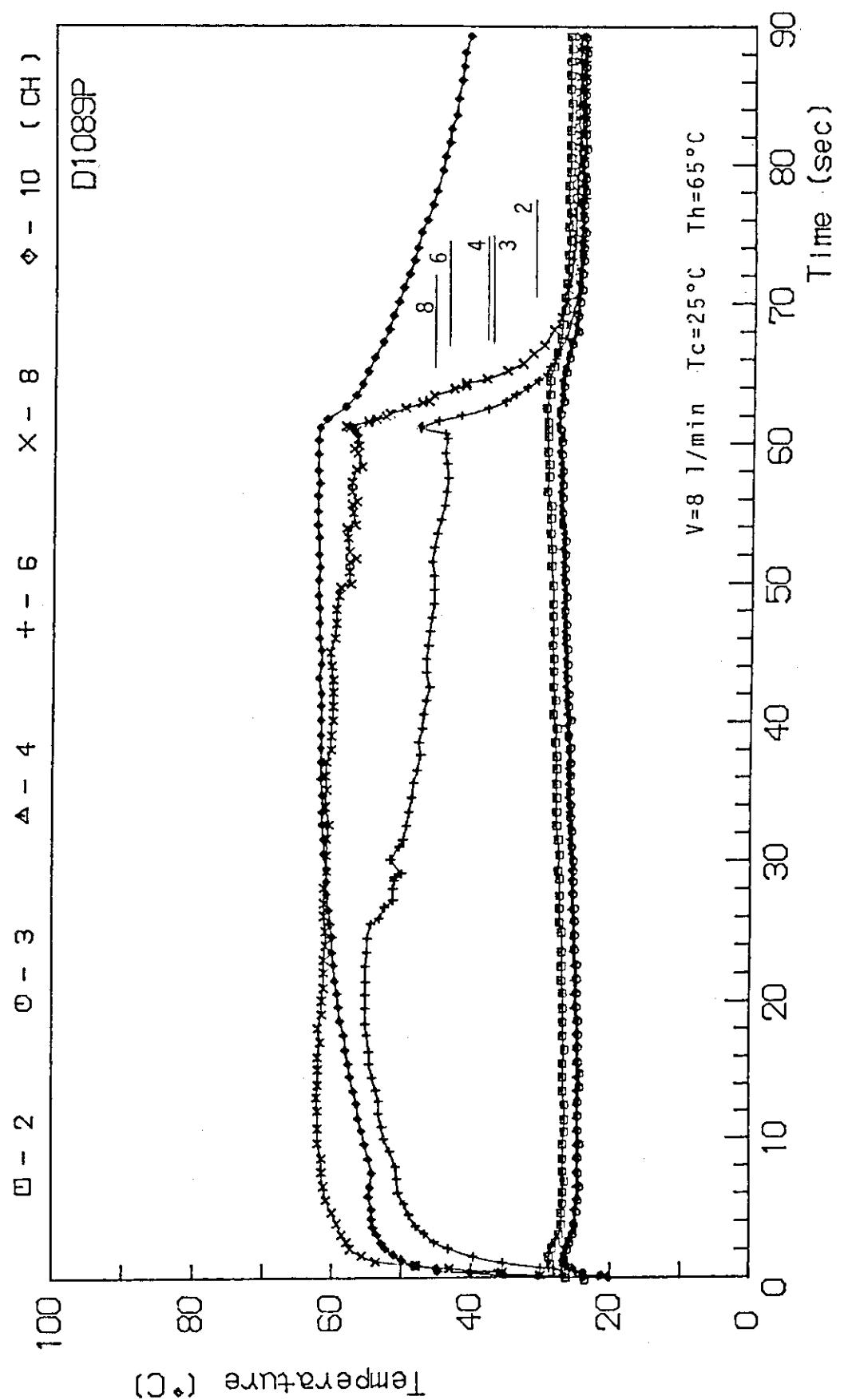


Fig. 3.4(43) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C ,
and Coolant flow rate = 8 l/min)

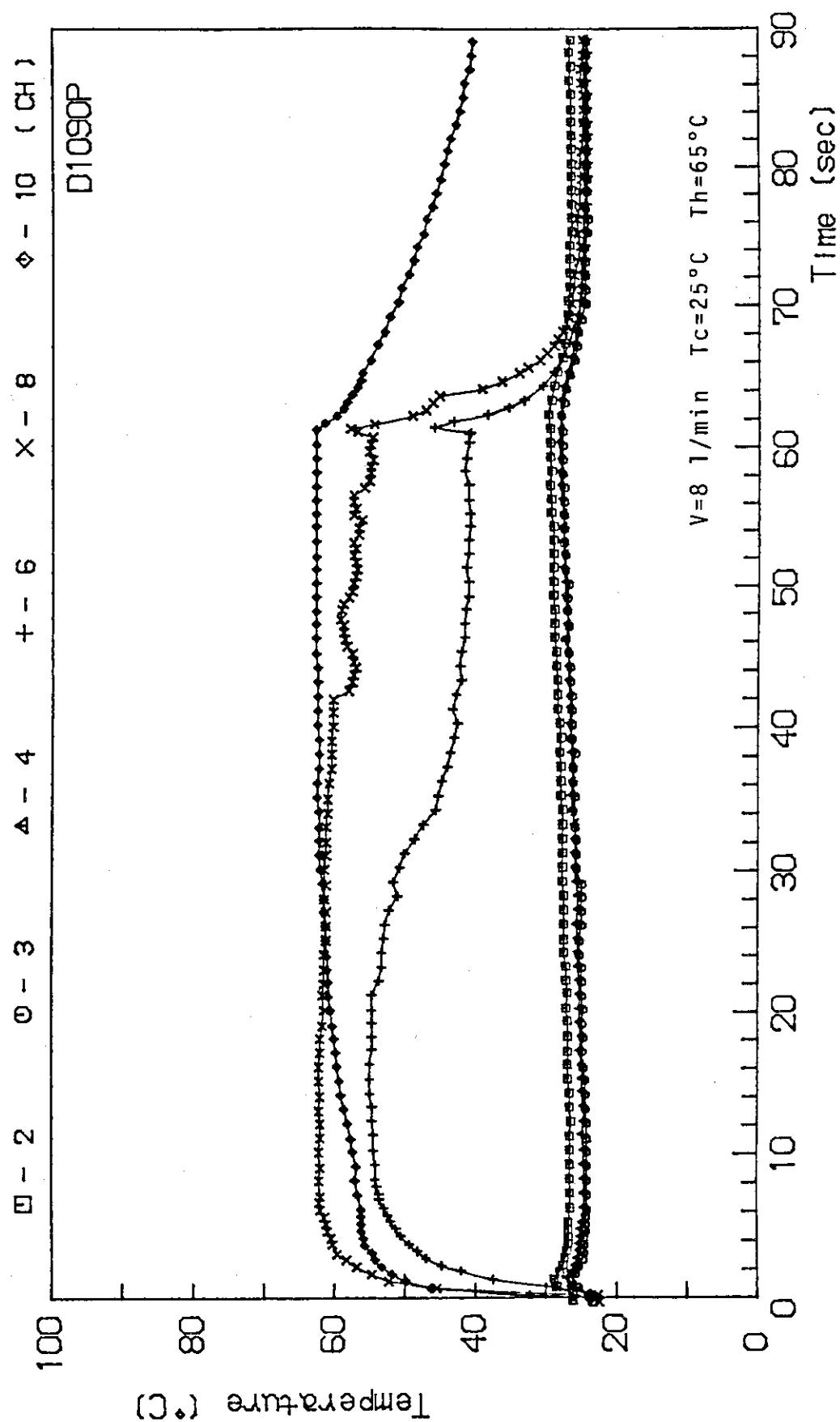


Fig. 3.4(44) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

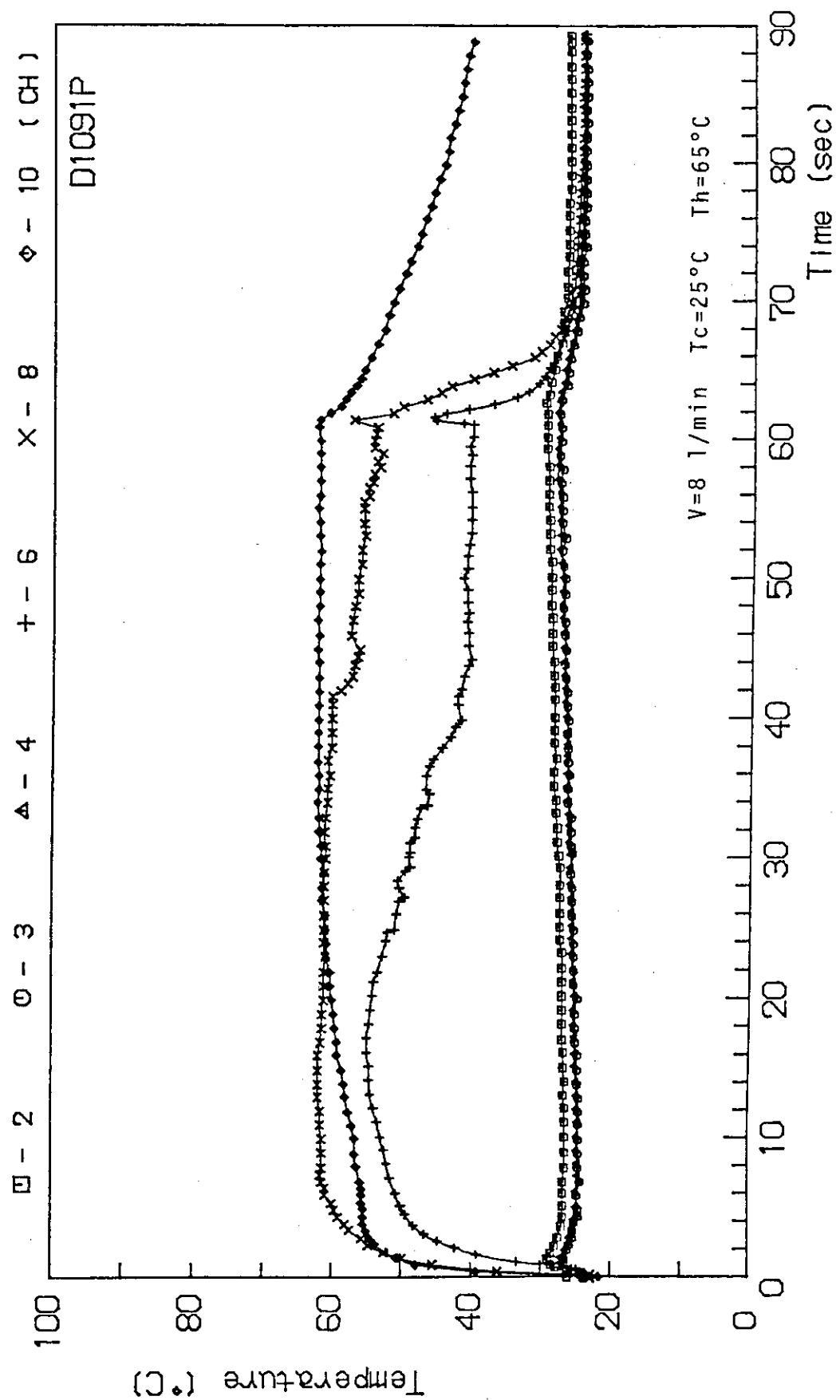


Fig. 3.4(45) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

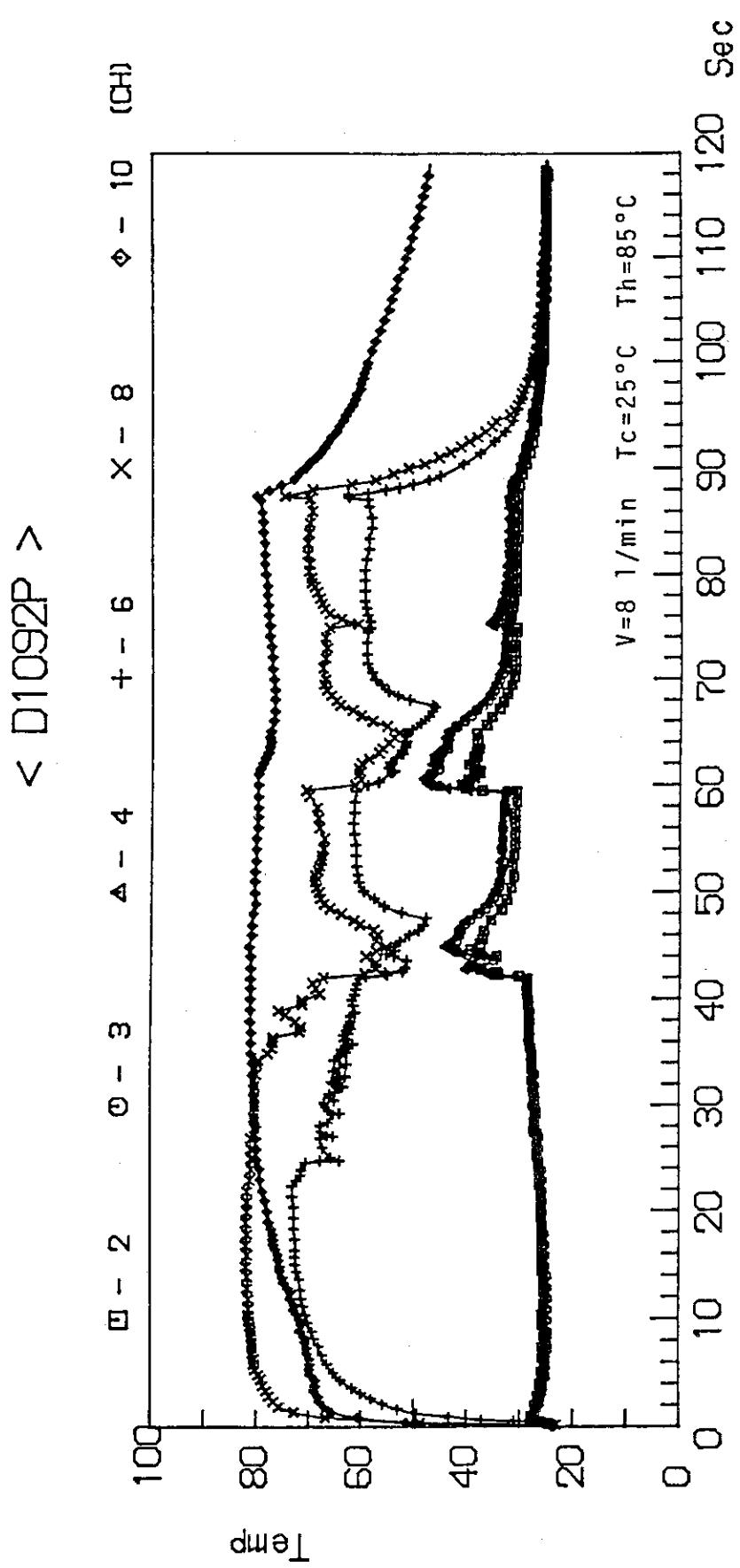


Fig. 3.4 (46) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
 (Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
 and Coolant flow rate = 8 l/min)

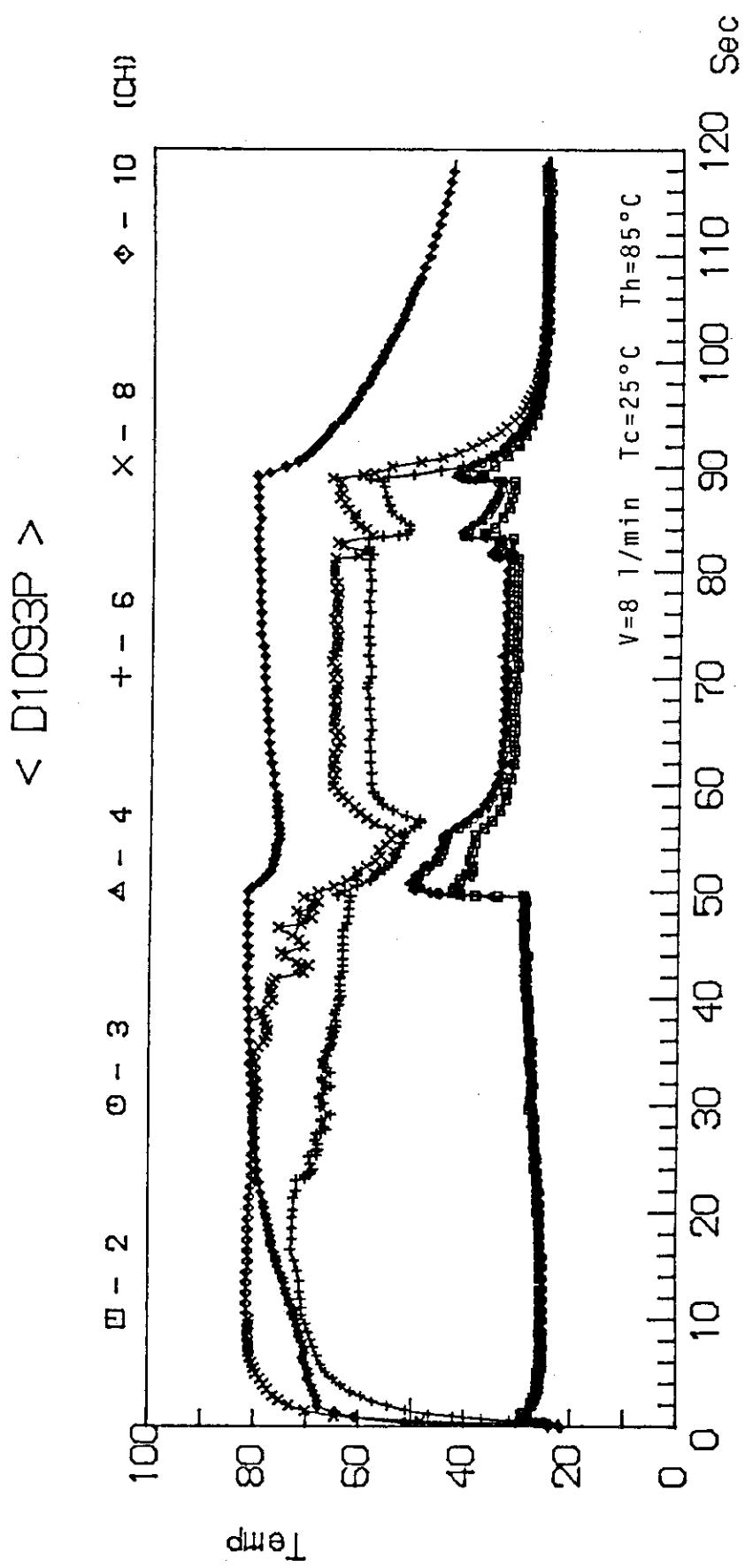


Fig. 3.4(47) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
 (Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
 and Coolant flow rate = 8 l/min)

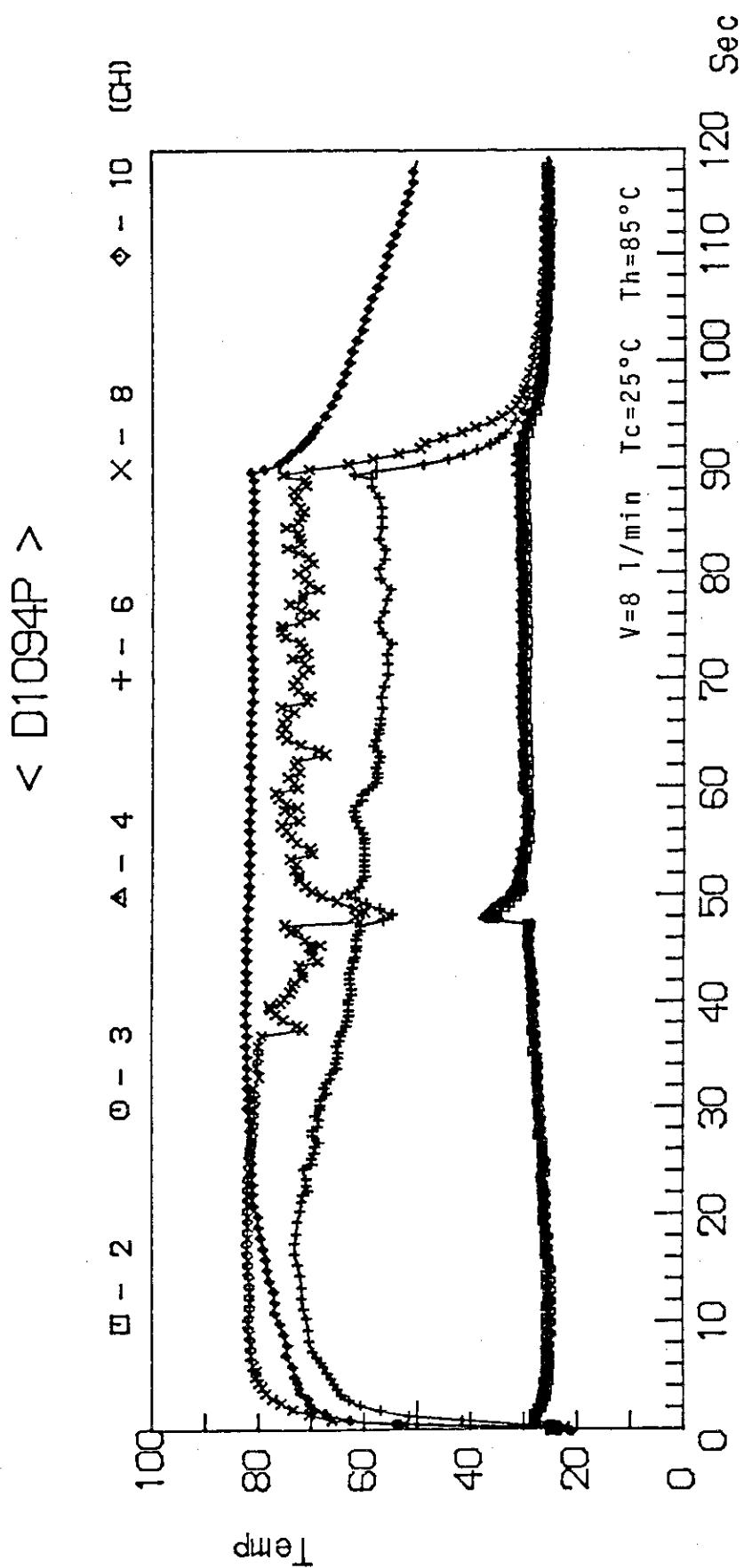


Fig. 3.4(48) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
 (Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
 and Coolant flow rate = 8 l/min)

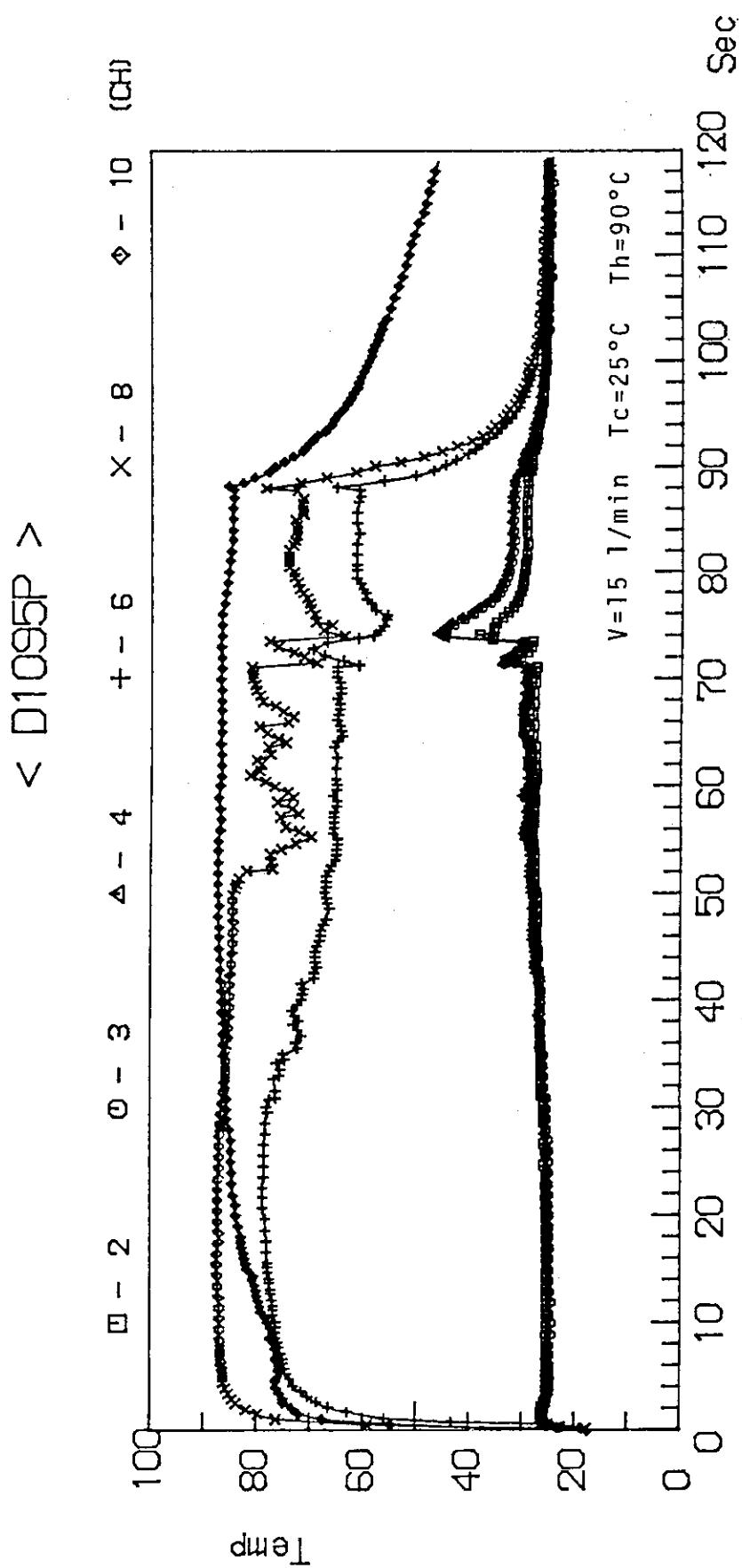


Fig. 3.4(49) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

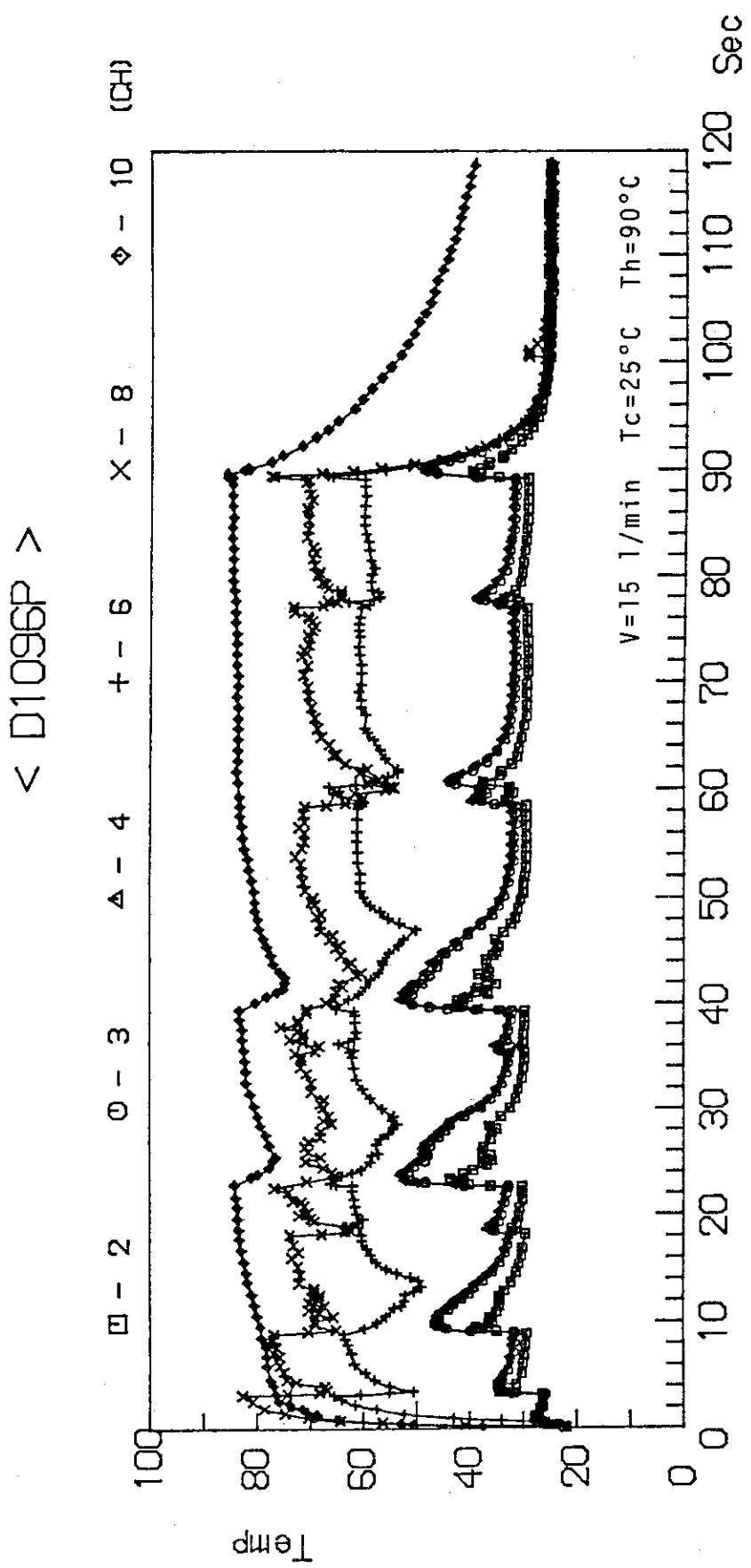


Fig. 3.4(50) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

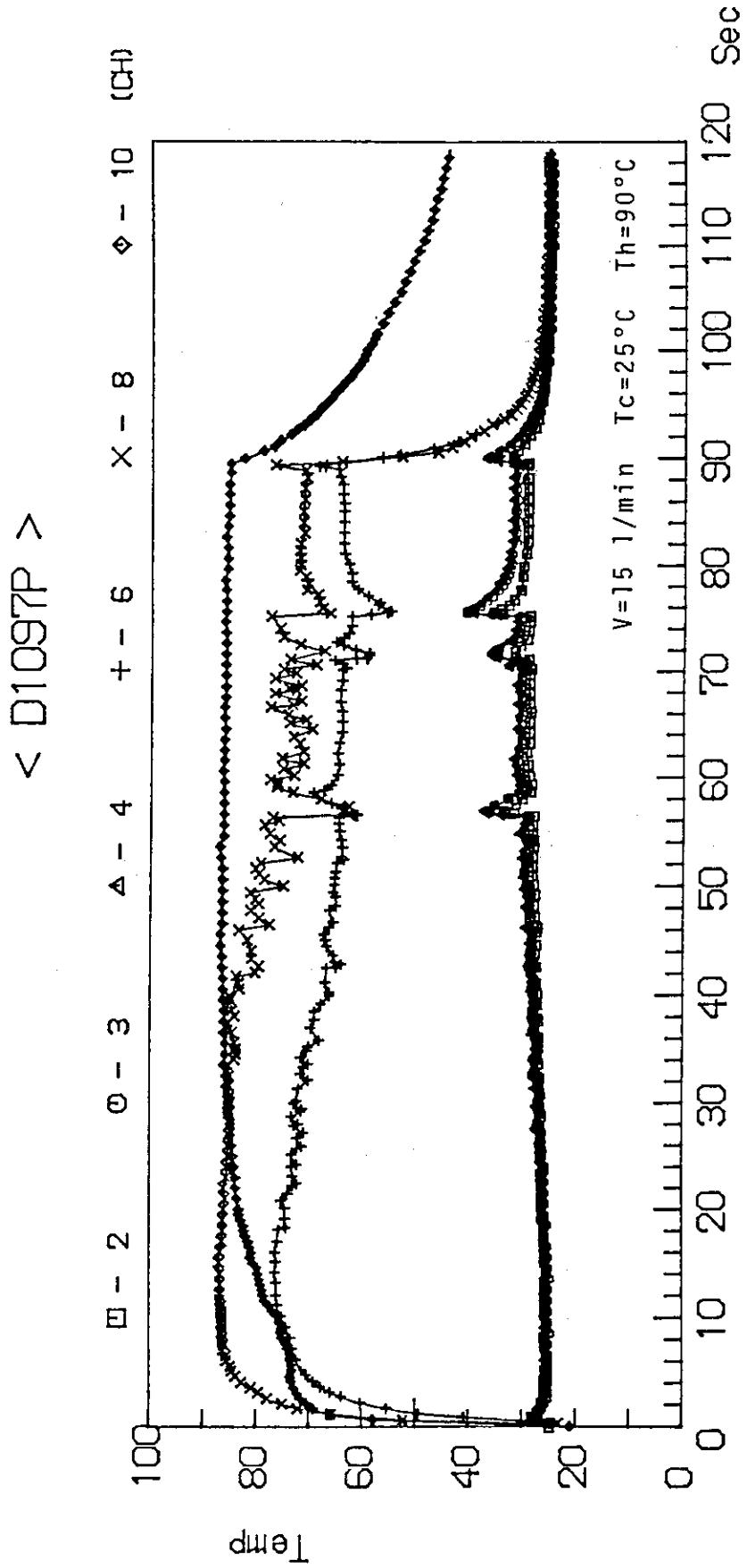


Fig. 3.4(51) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
 (Bath temp. = 90°C , Coolant temp. = 25°C
 and Coolant flow rate = 15 l/min)

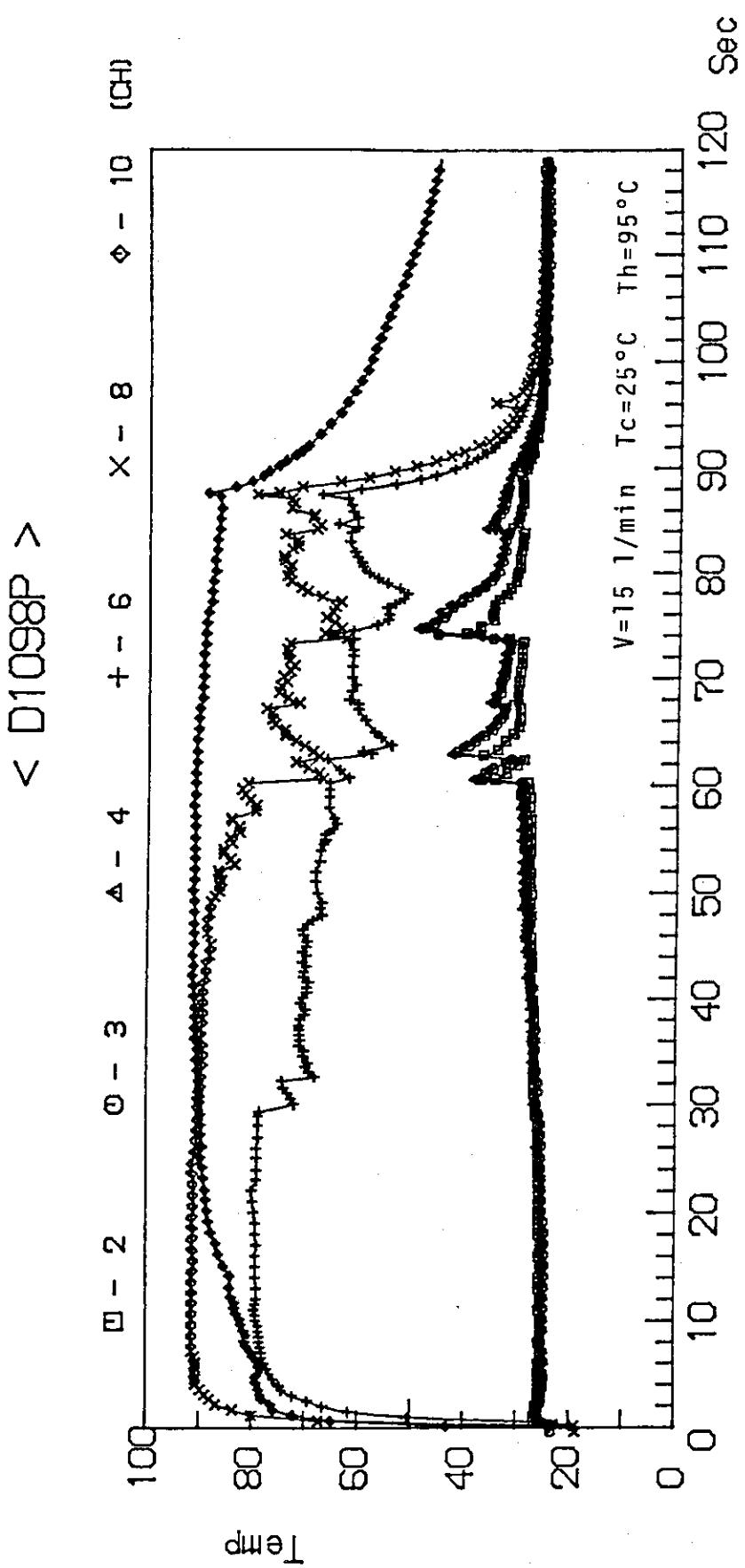


Fig. 3.4(52) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

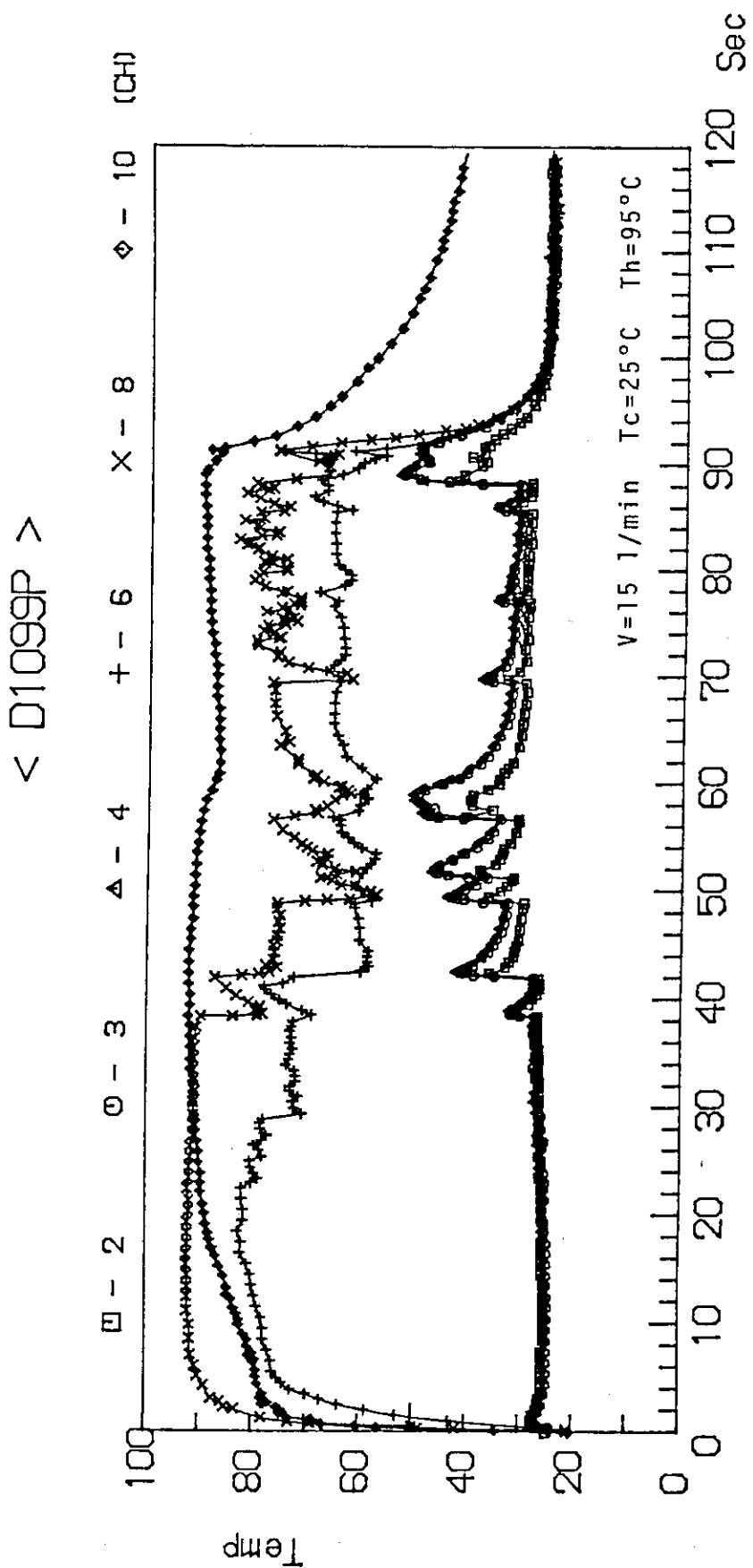


Fig. 3.4(53) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
 (Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
 and Coolant flow rate = 15 l/min)

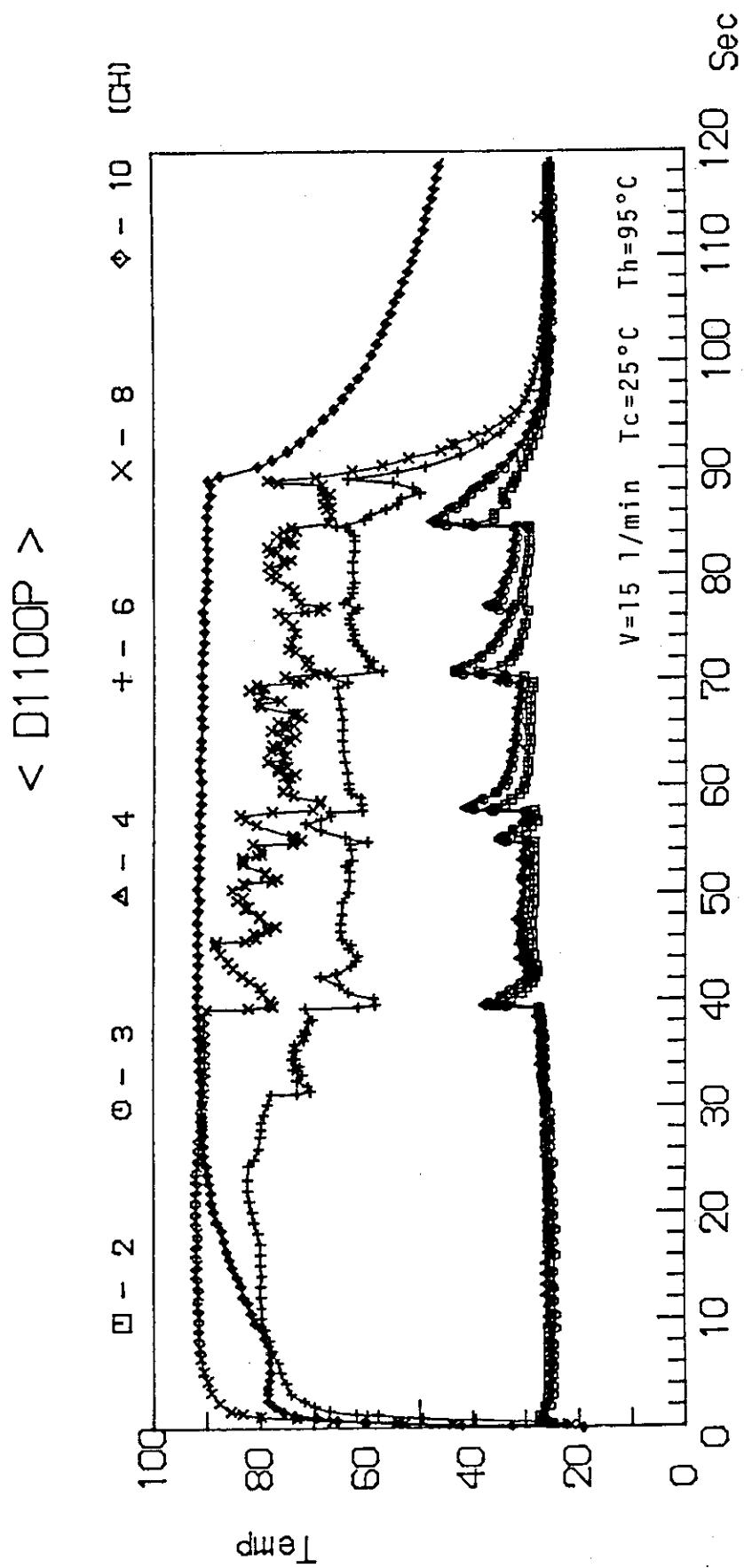


Fig. 3.4(54) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
 (Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
 and Coolant flow rate = 15 l/min)

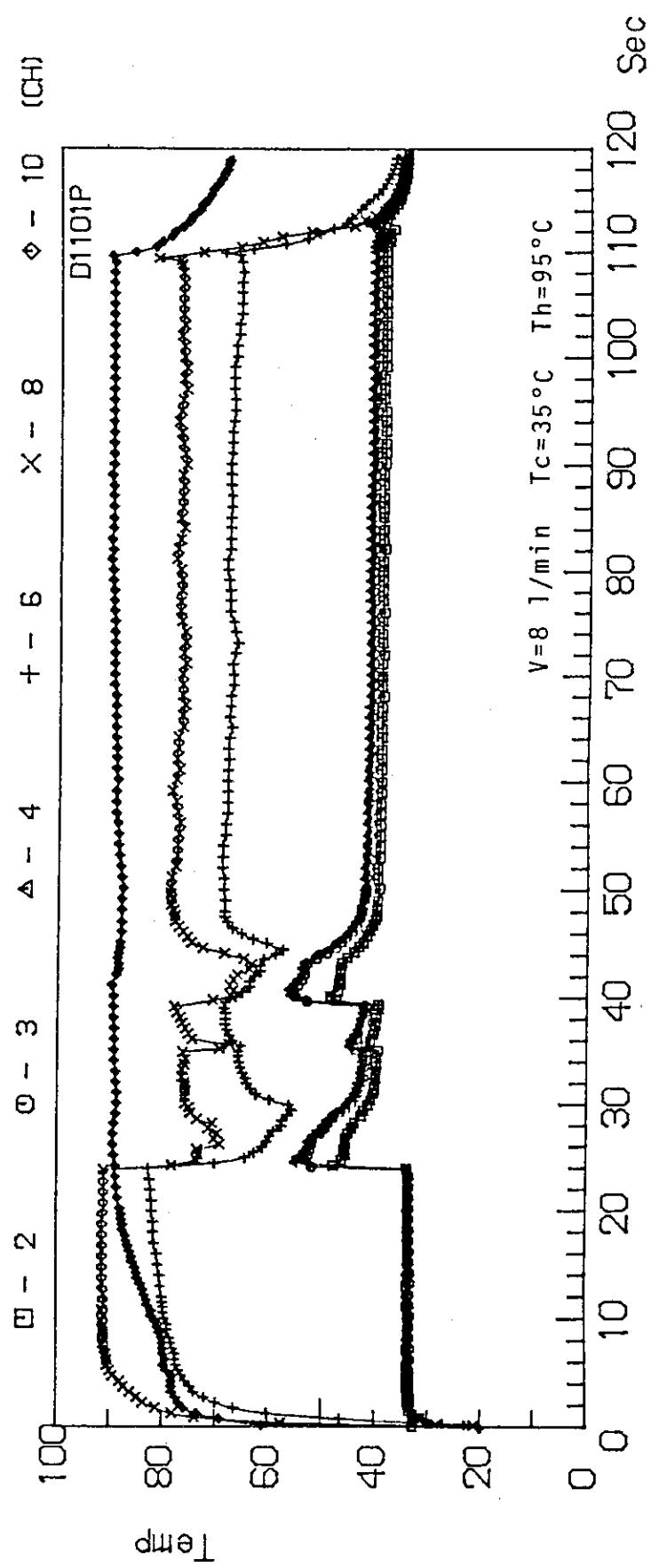


Fig. 3.4(55) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
 (Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
 and Coolant flow rate = 8 l/min)

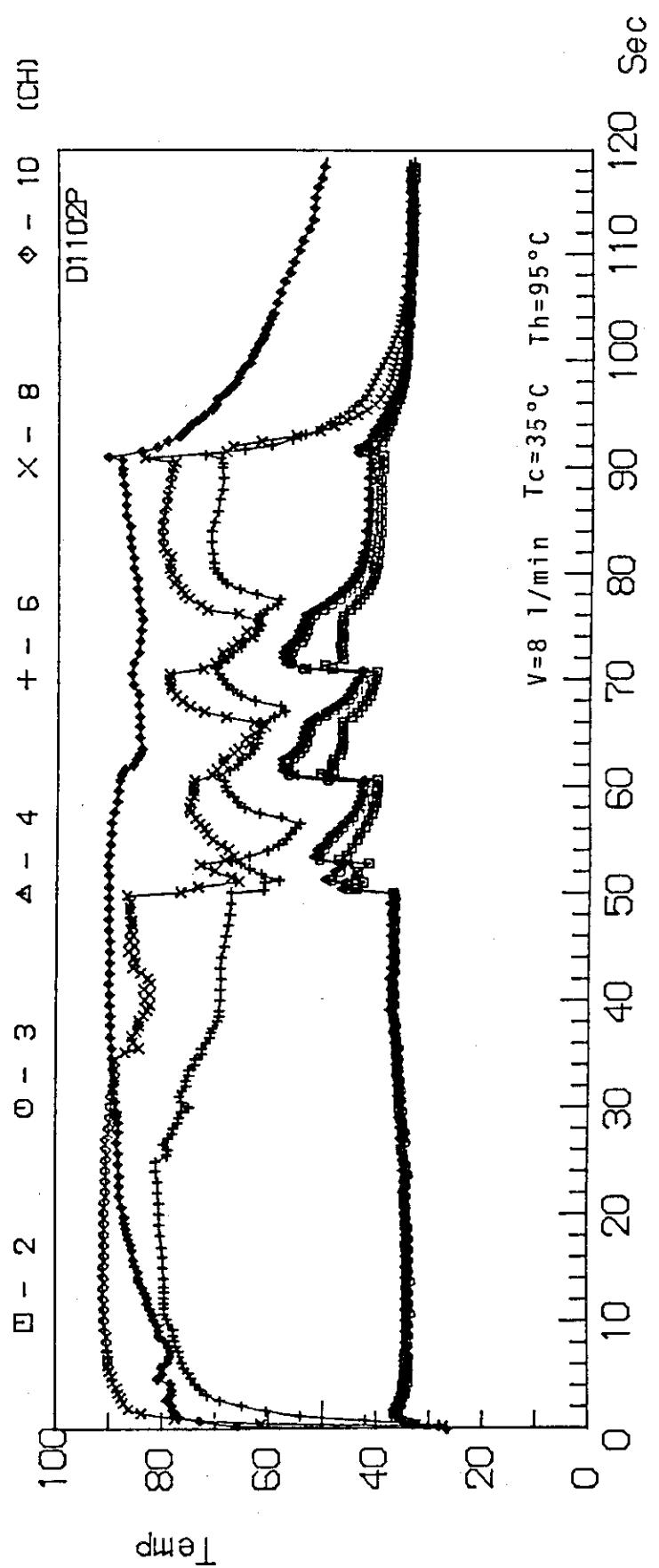


Fig. 3.4(56) Wall temperature of gravity assisted heat pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

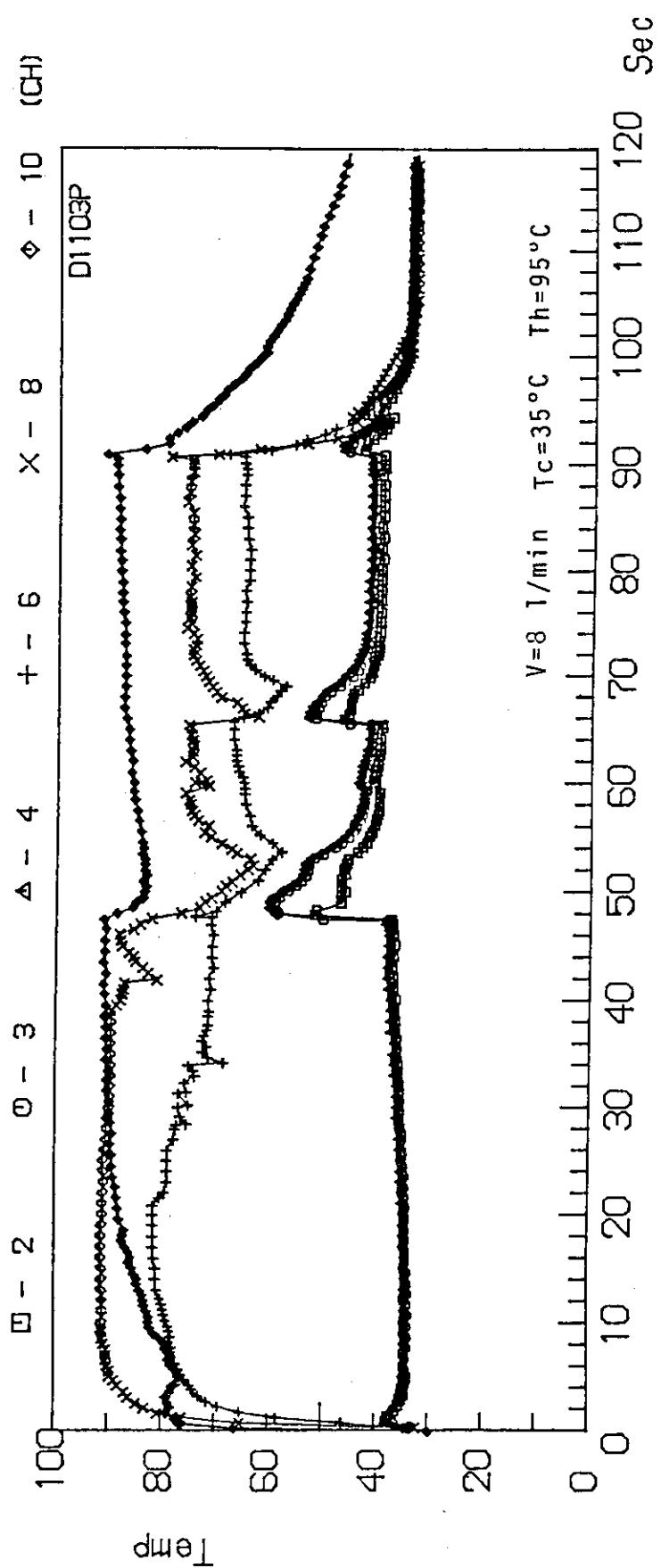


Fig. 3.4(57) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

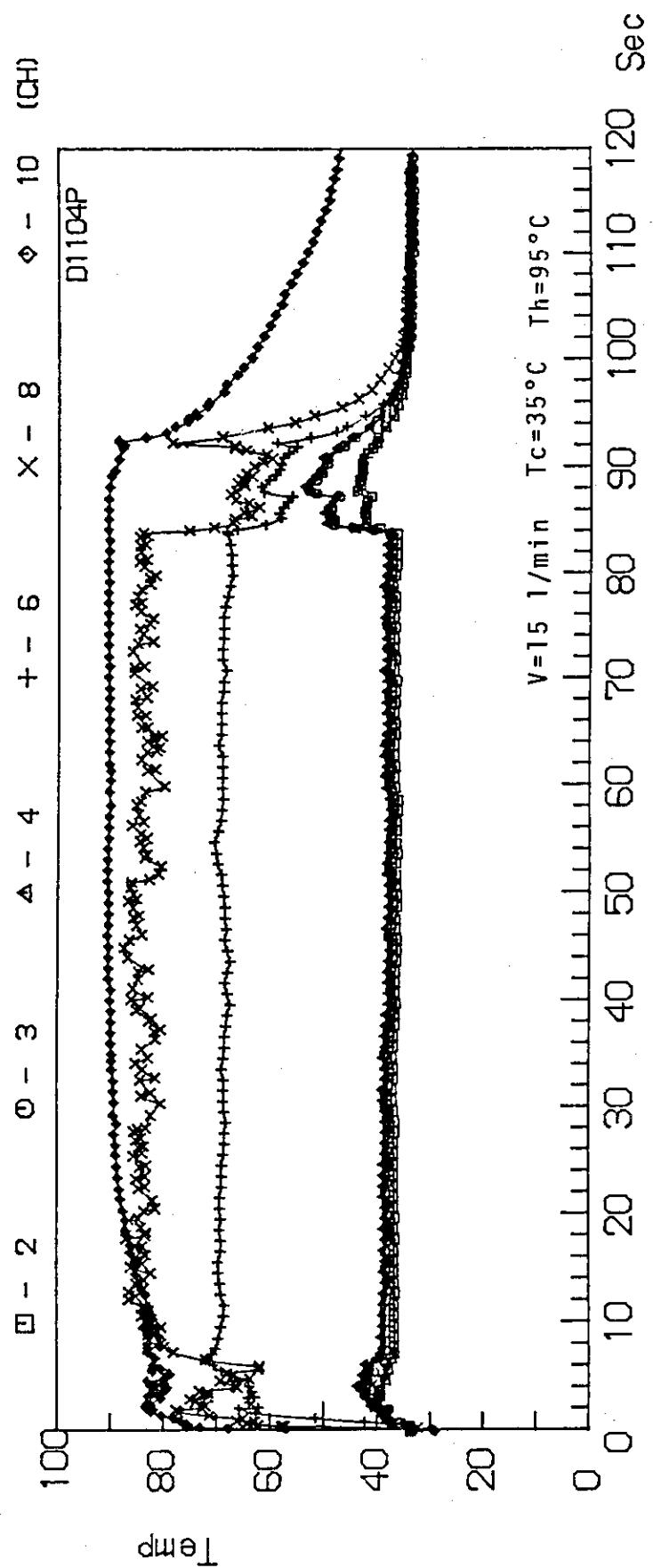
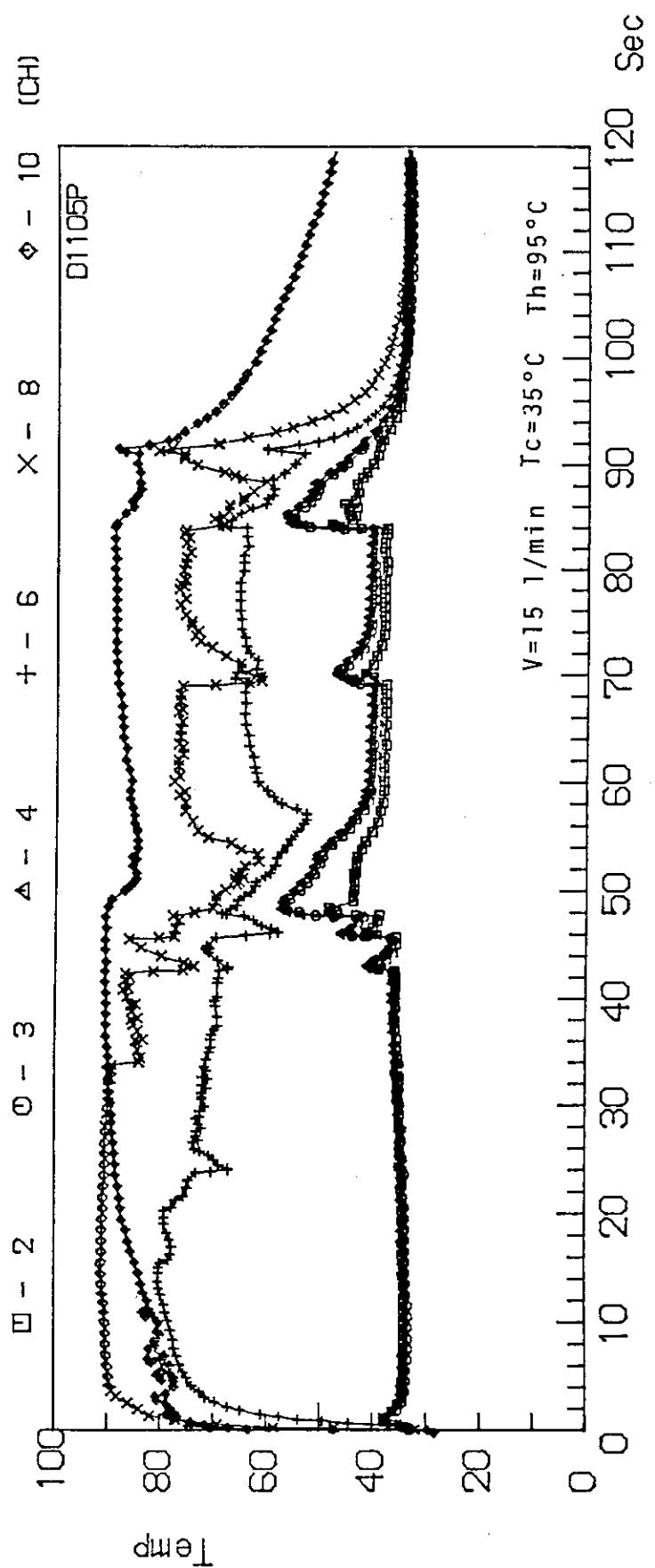


Fig. 3.4(58) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)



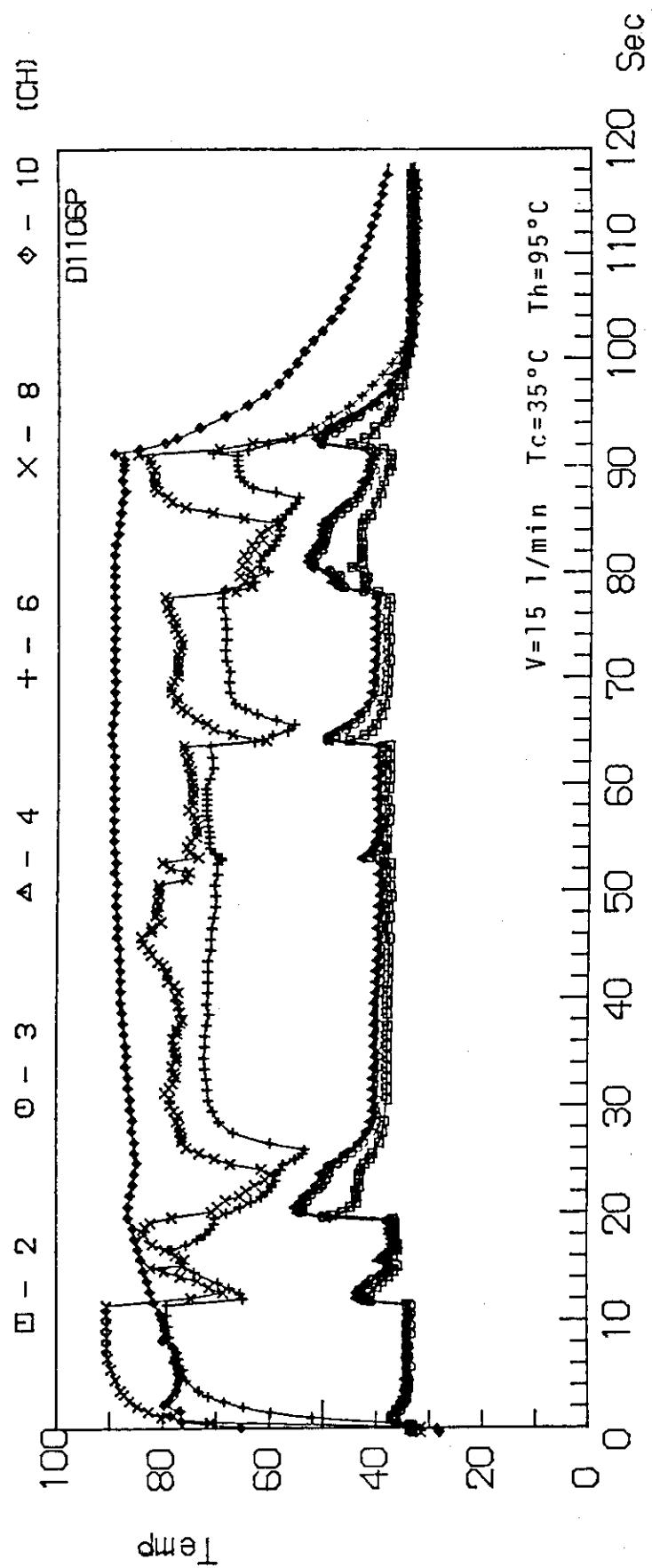


Fig. 3.4(60) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

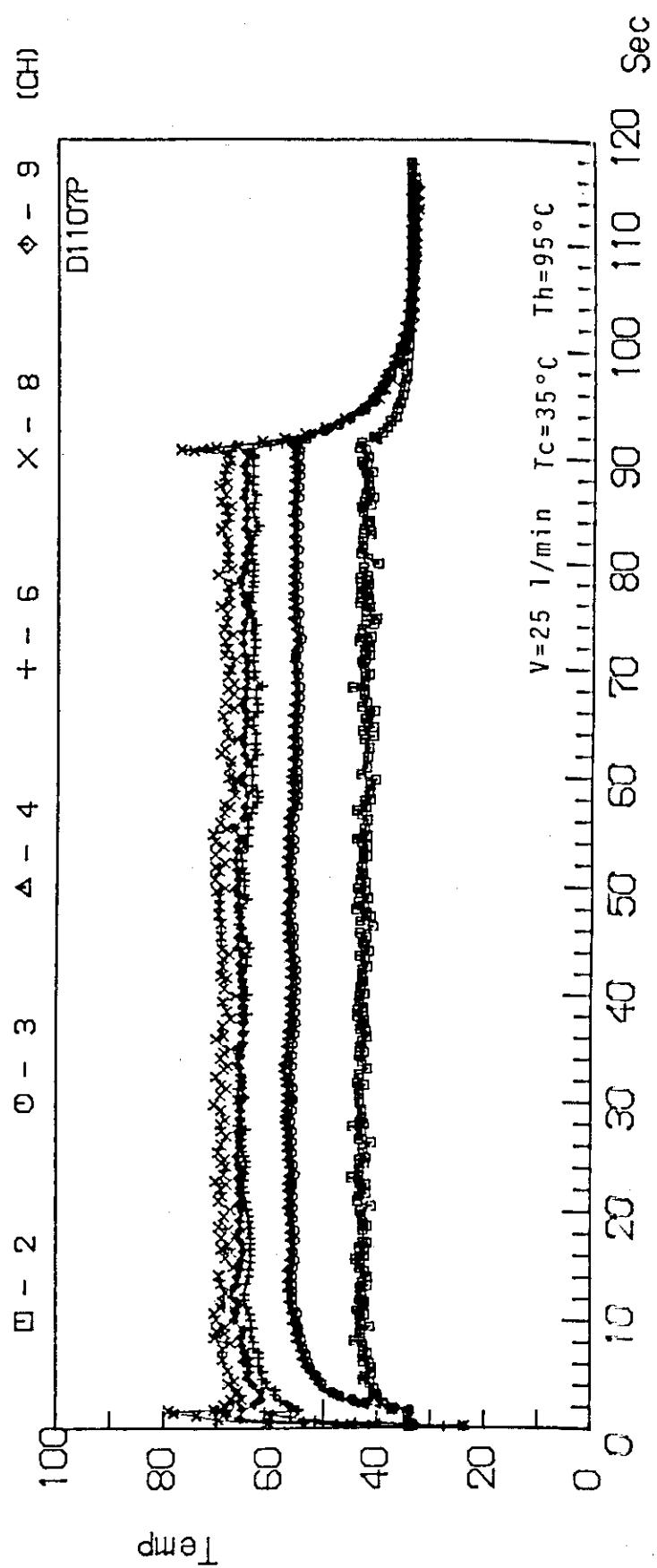


Fig. 3.4(61) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

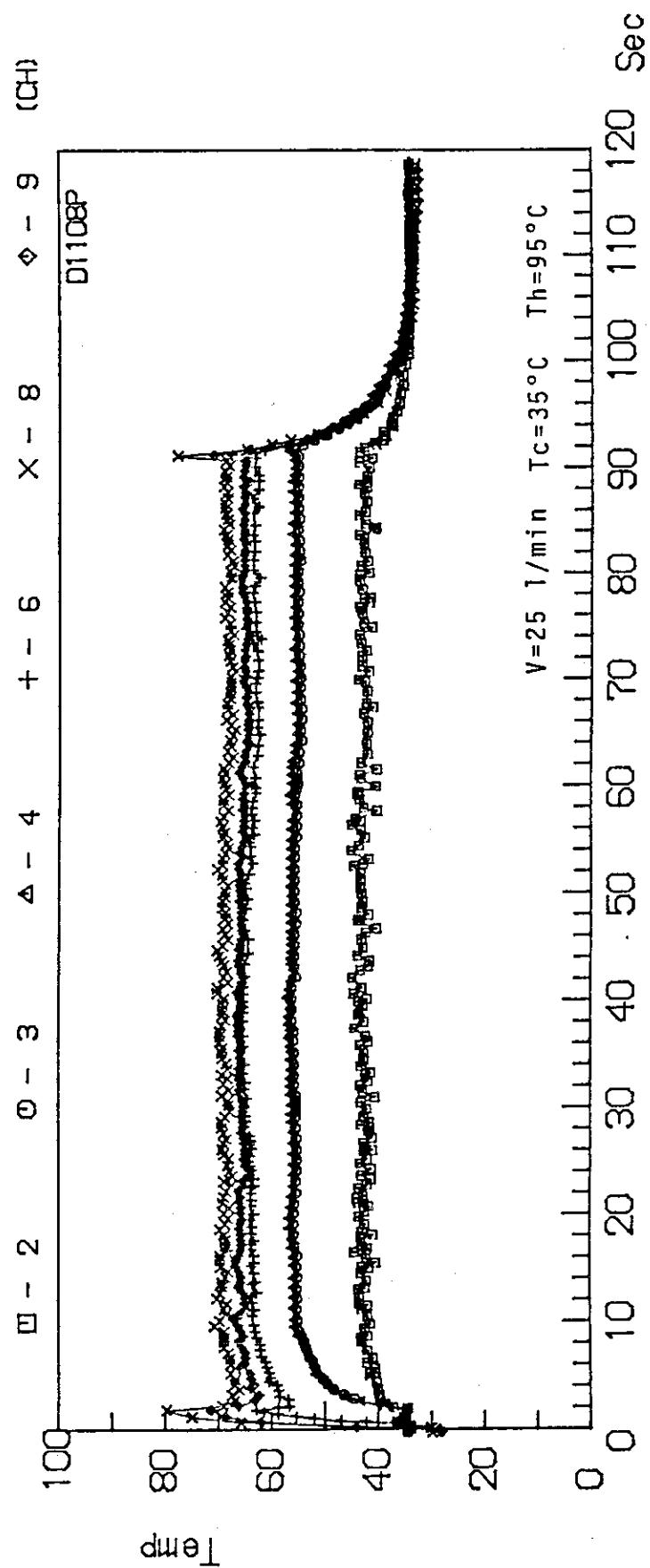


Fig. 3.4(62) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

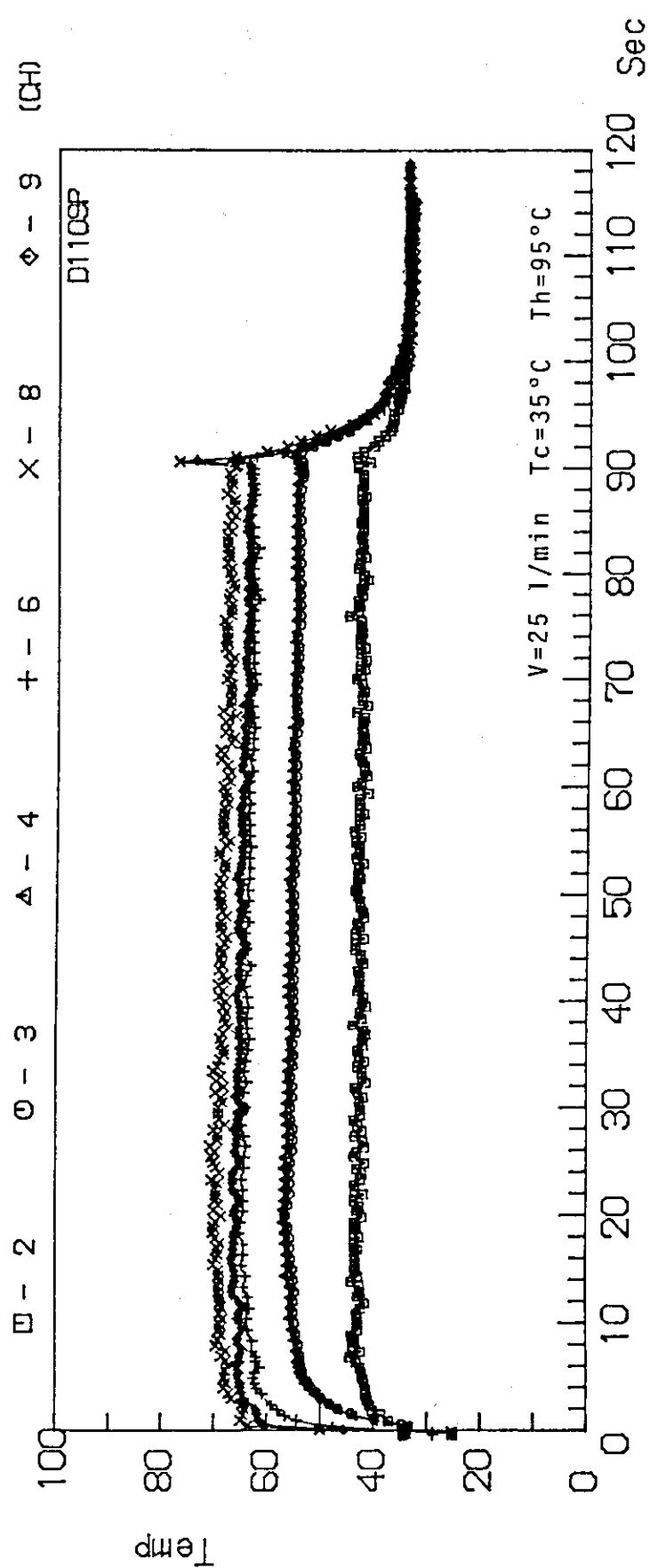


Fig. 3.4(63) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

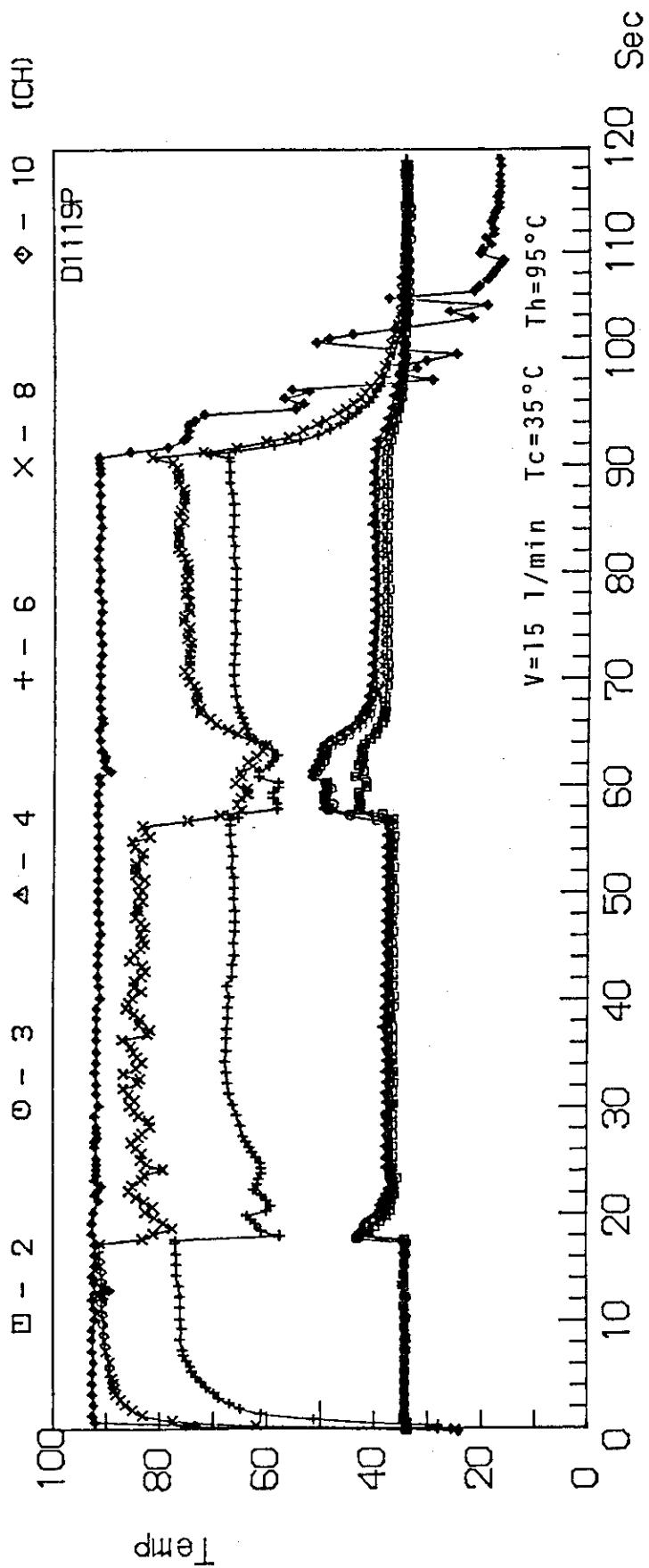


Fig. 3.4(64) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

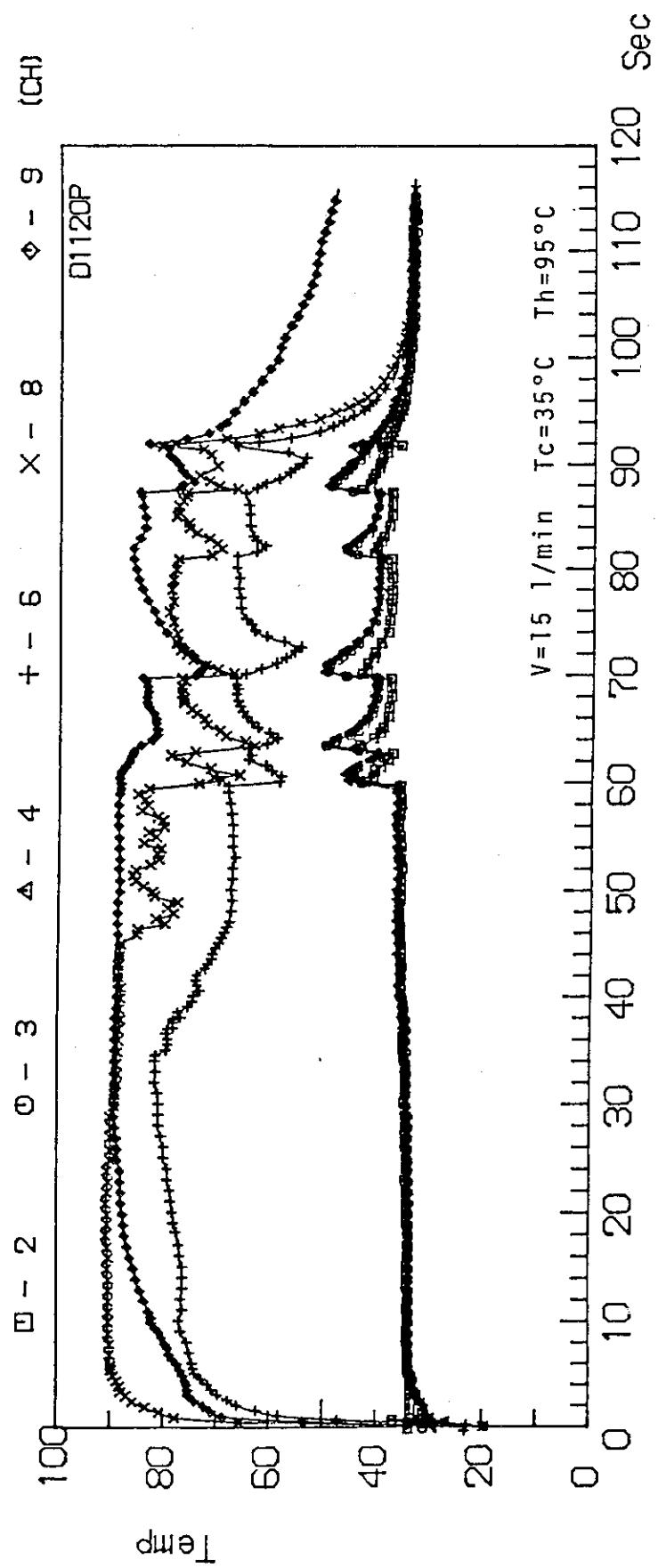


Fig. 3.4(65) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

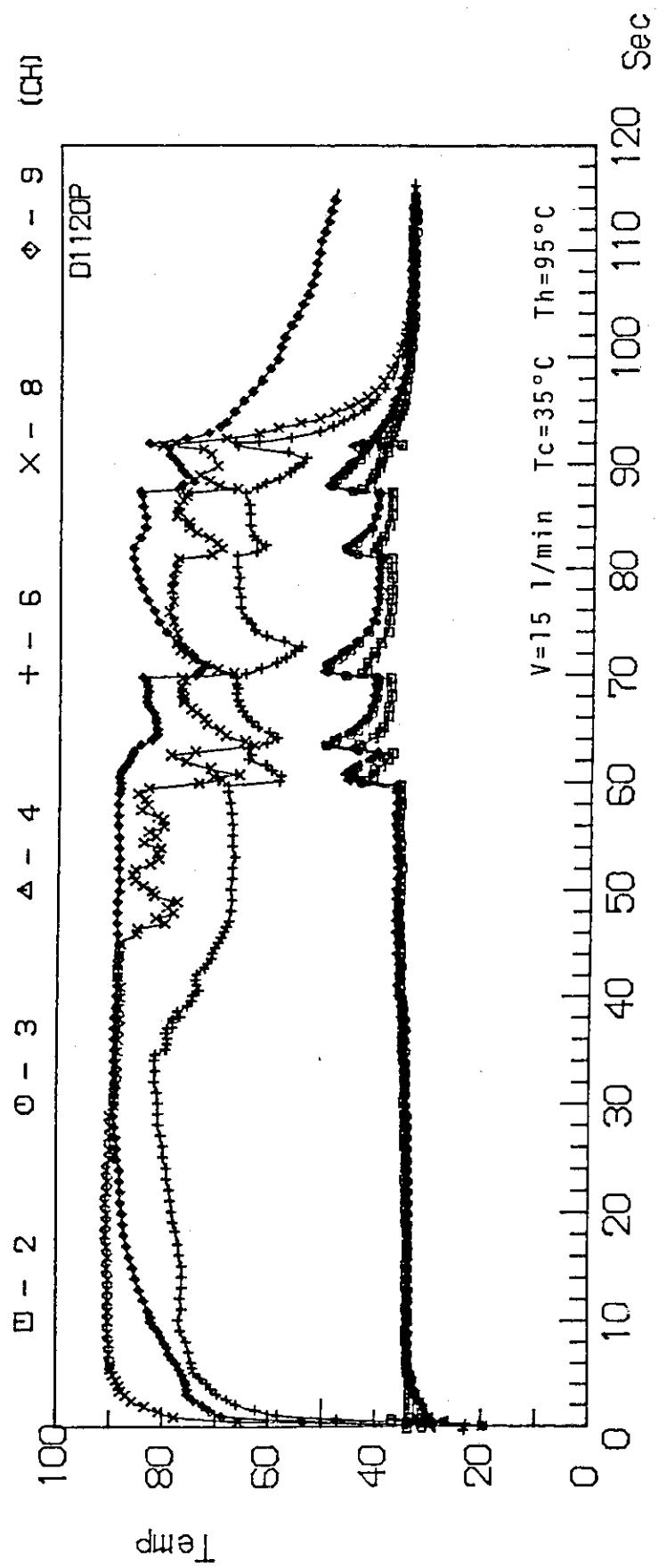


Fig. 3.4(65) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

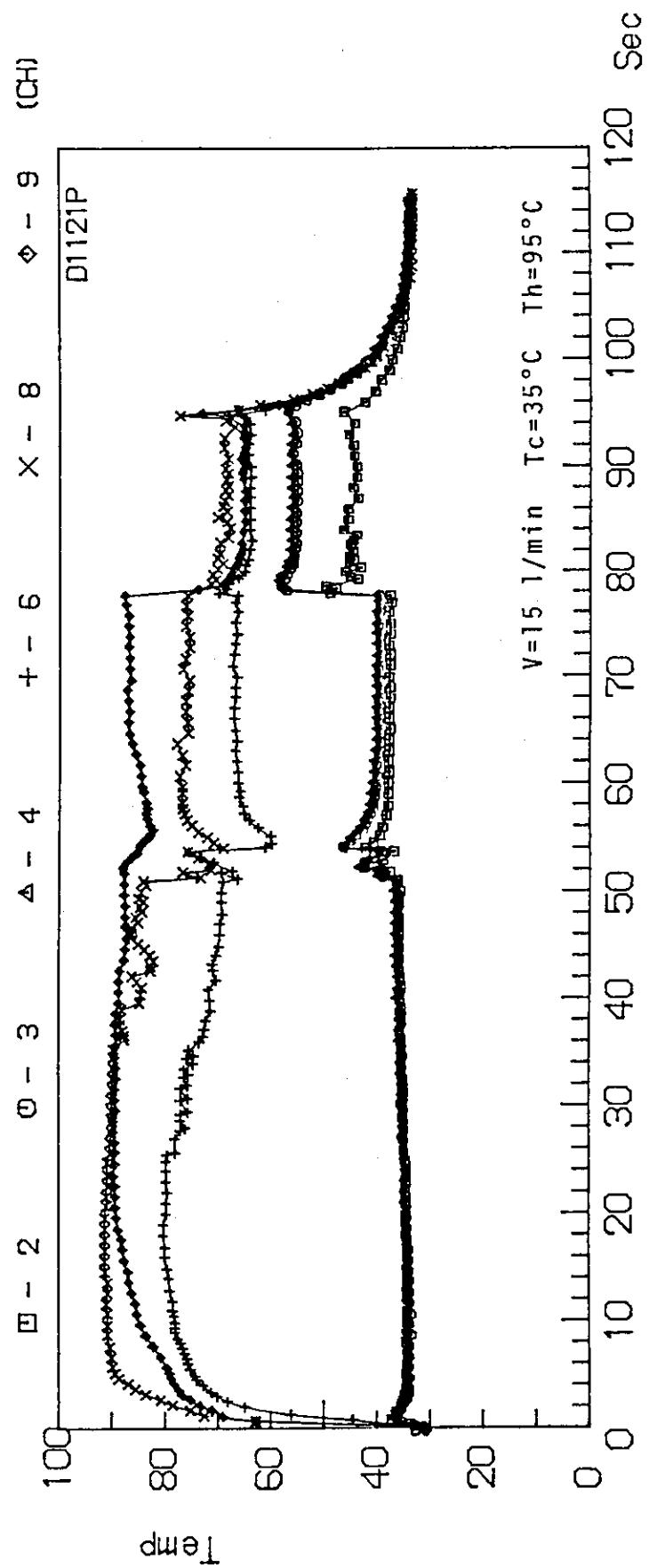


Fig. 3.4(66) Wall temperature of gravity assisted heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 35°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

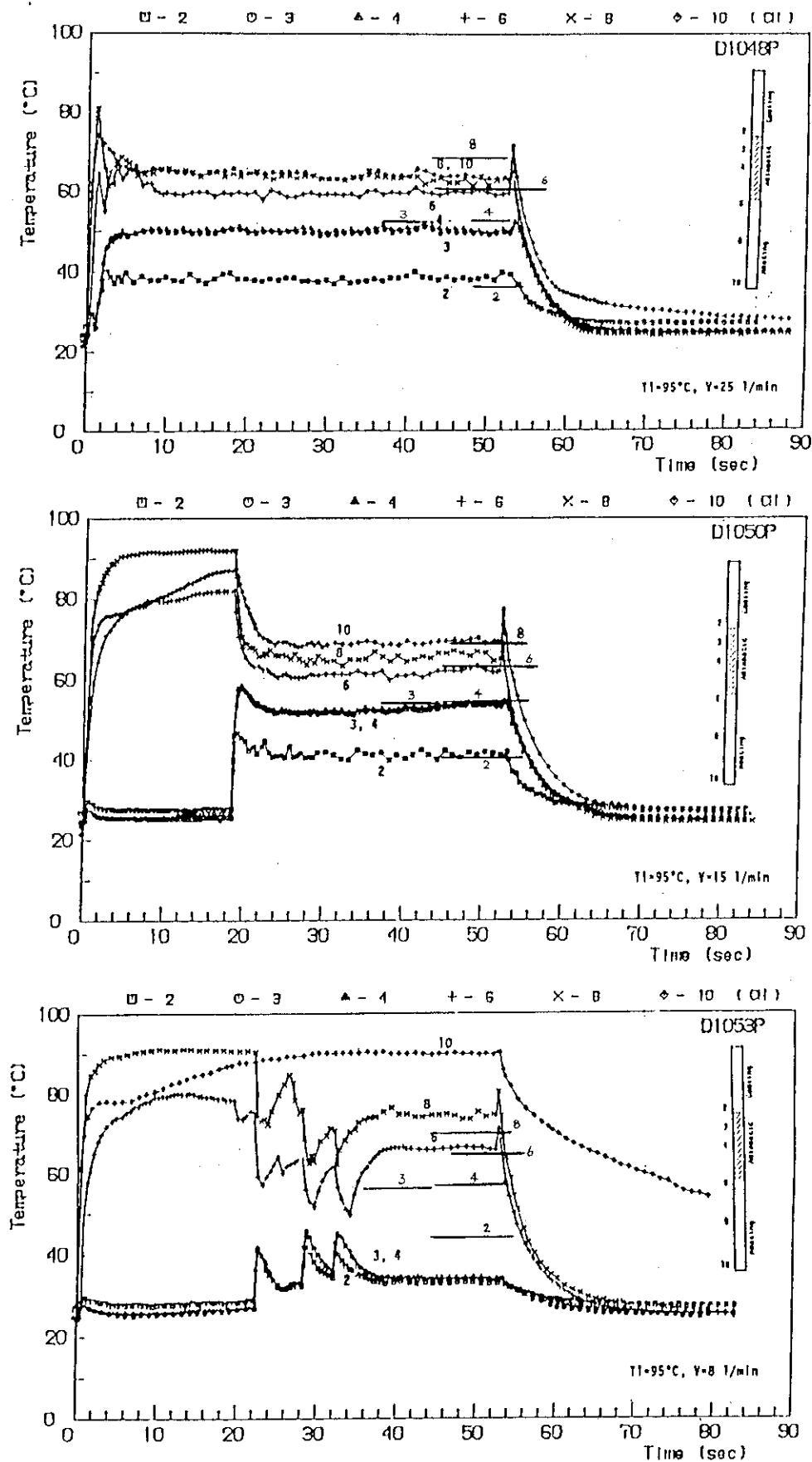


Fig. 3.4(67) Effect of coolant flow rate for water bath temperature (95°C)

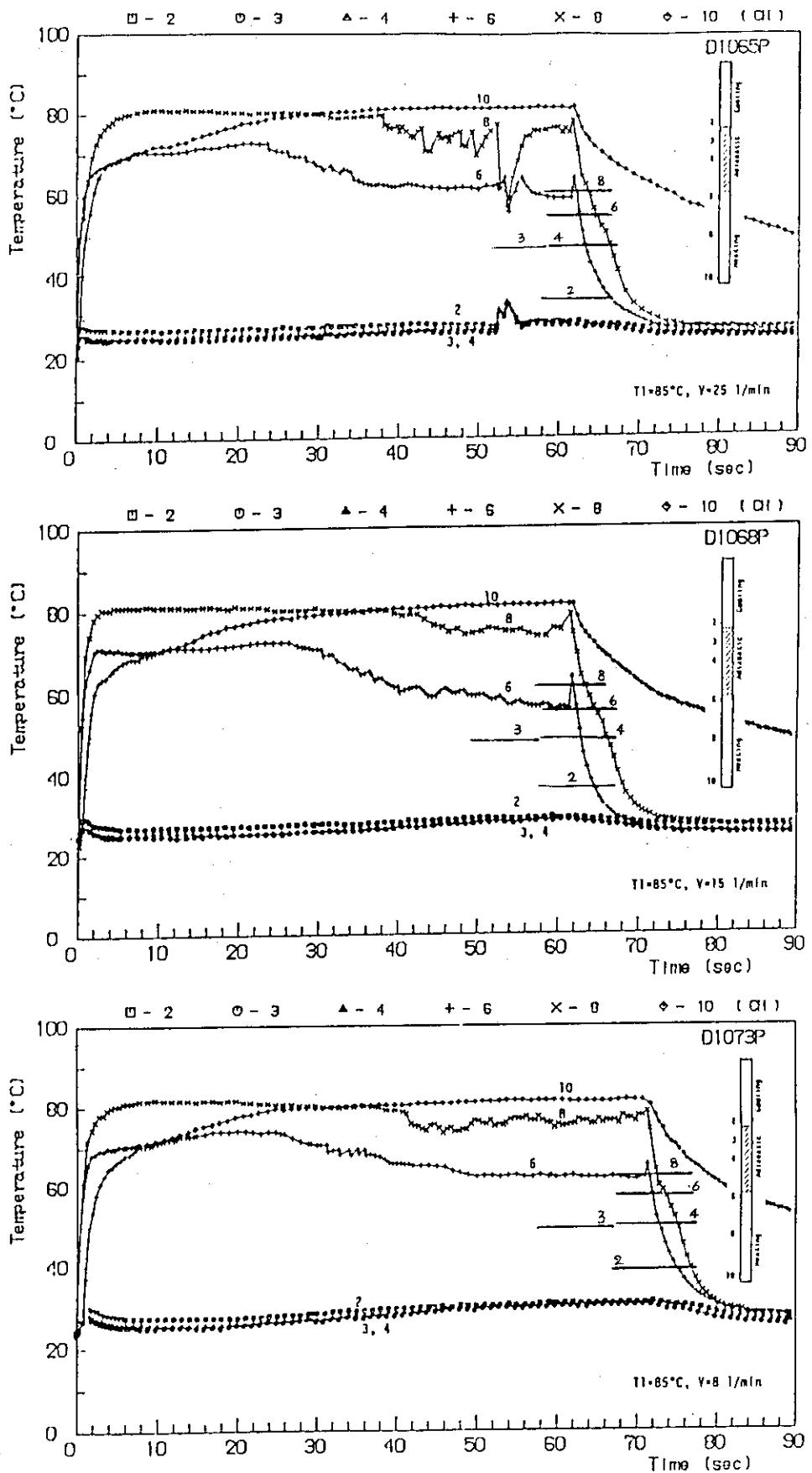


Fig. 3.4(68) Effect of coolant flow rate for water bath temperature (85°C)

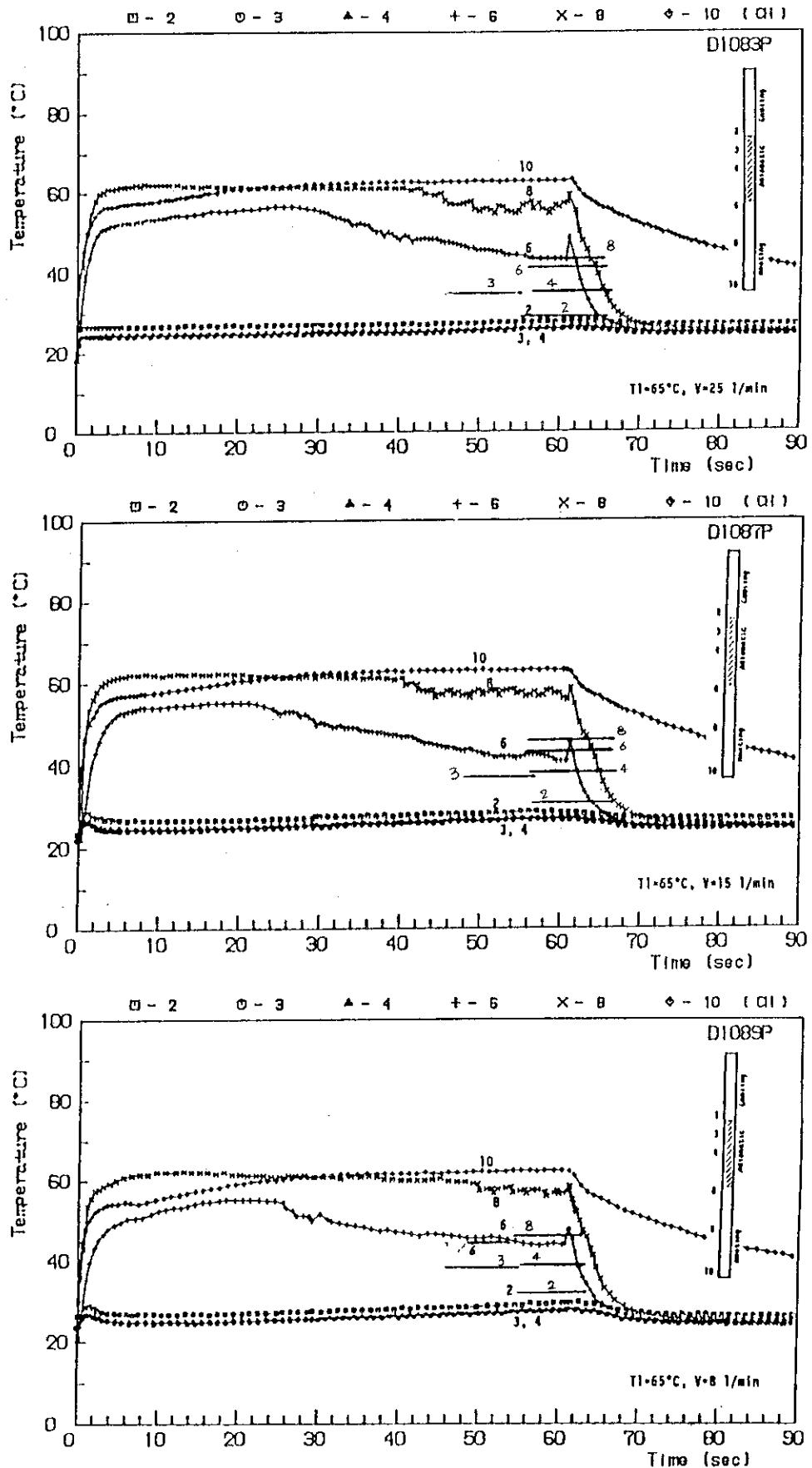


Fig. 3.4(69) Effect of coolant flow rate for water bath temperature (65°C)

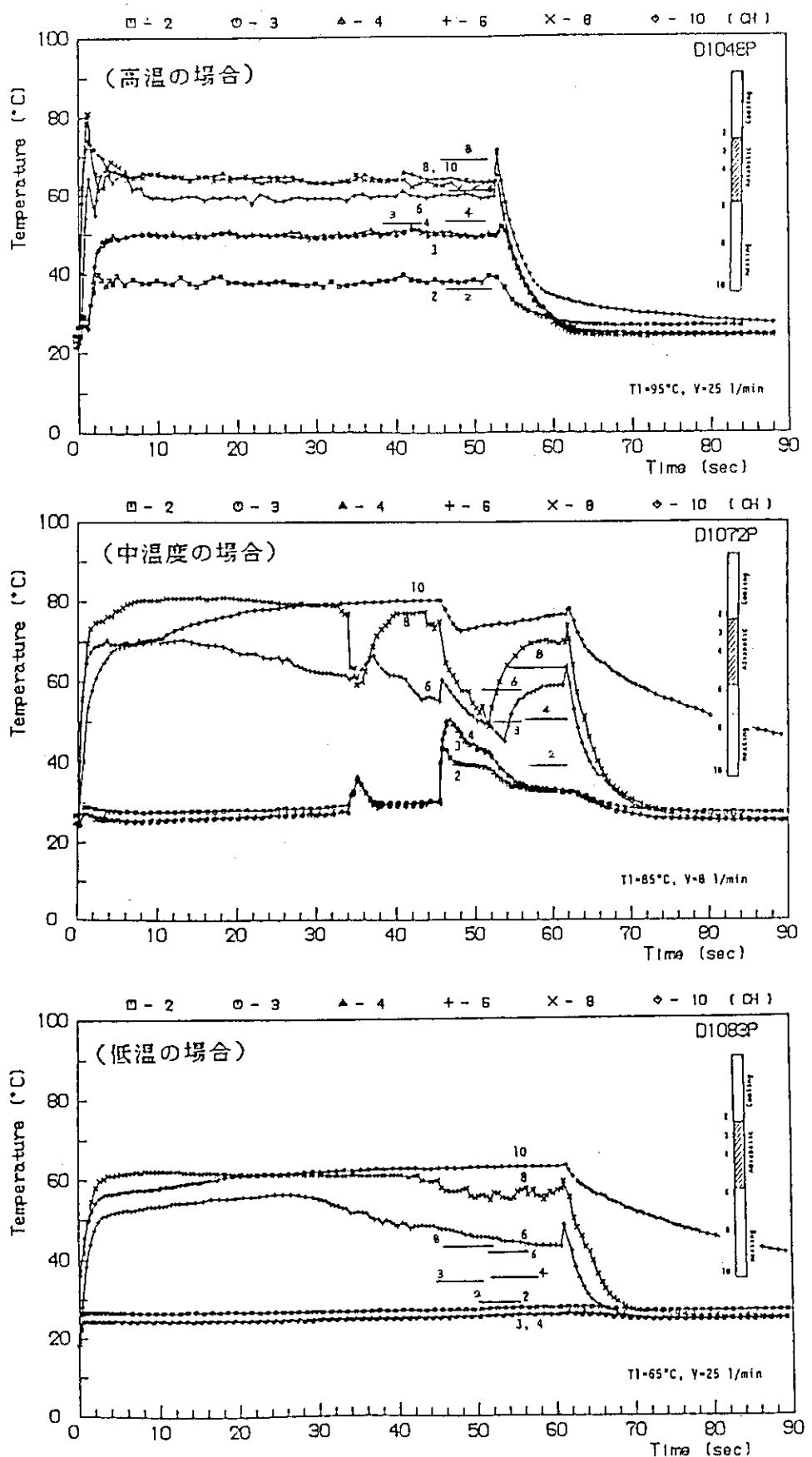


Fig. 3.4(70) Effect of water bath temperature

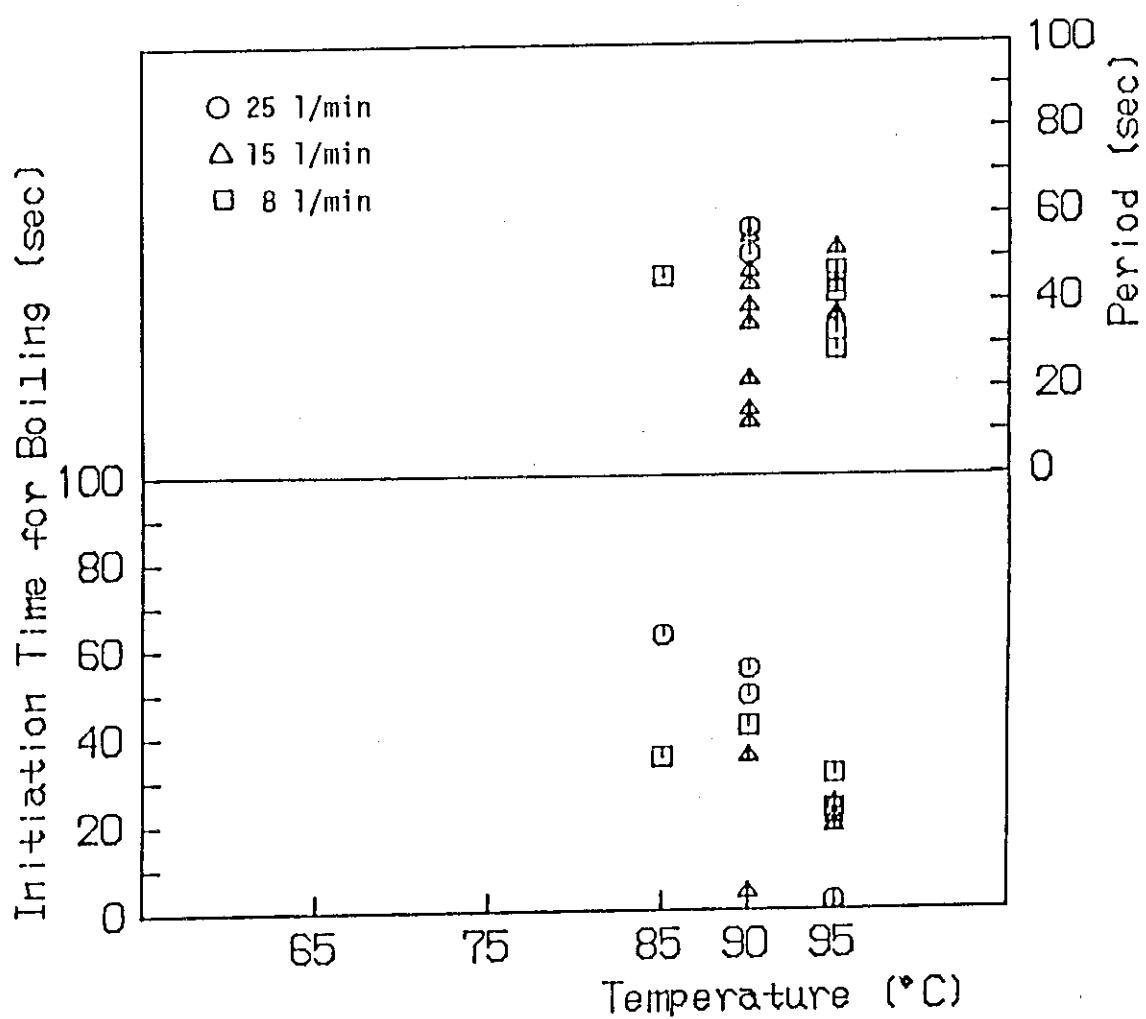


Fig. 3.4(71) Initiation time for boiling and period

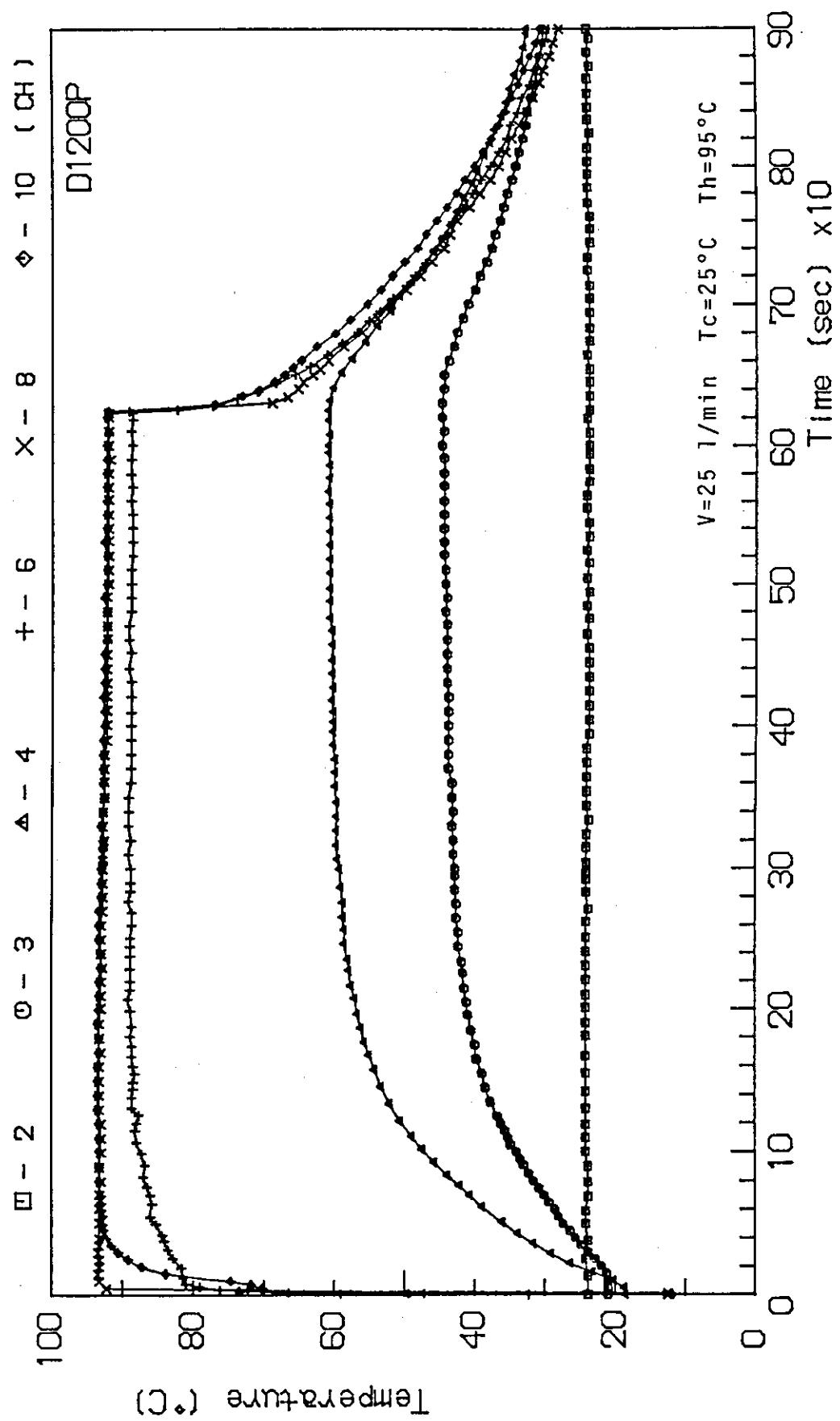


Fig. 3.5(1) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

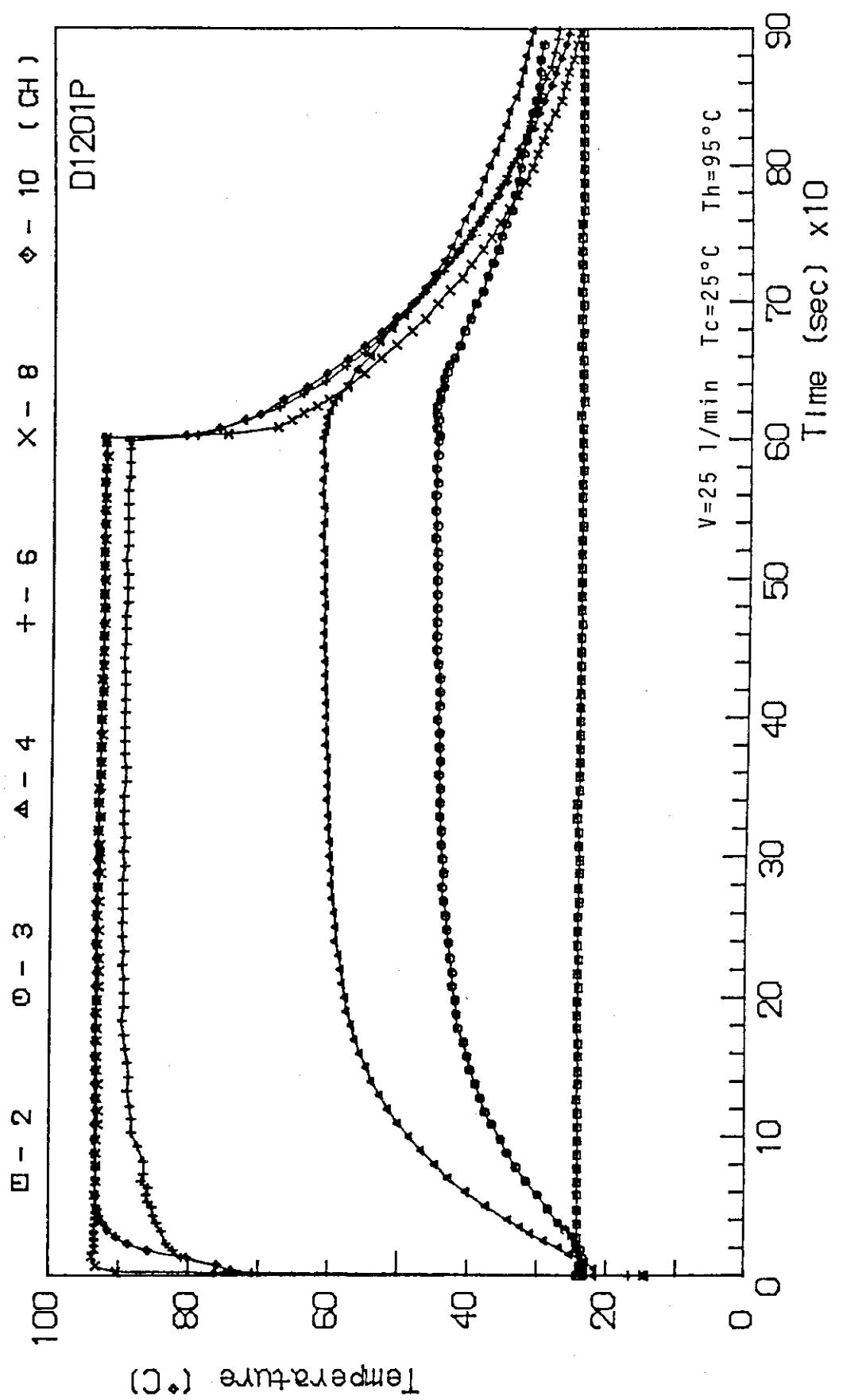


Fig. 3.5(2) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

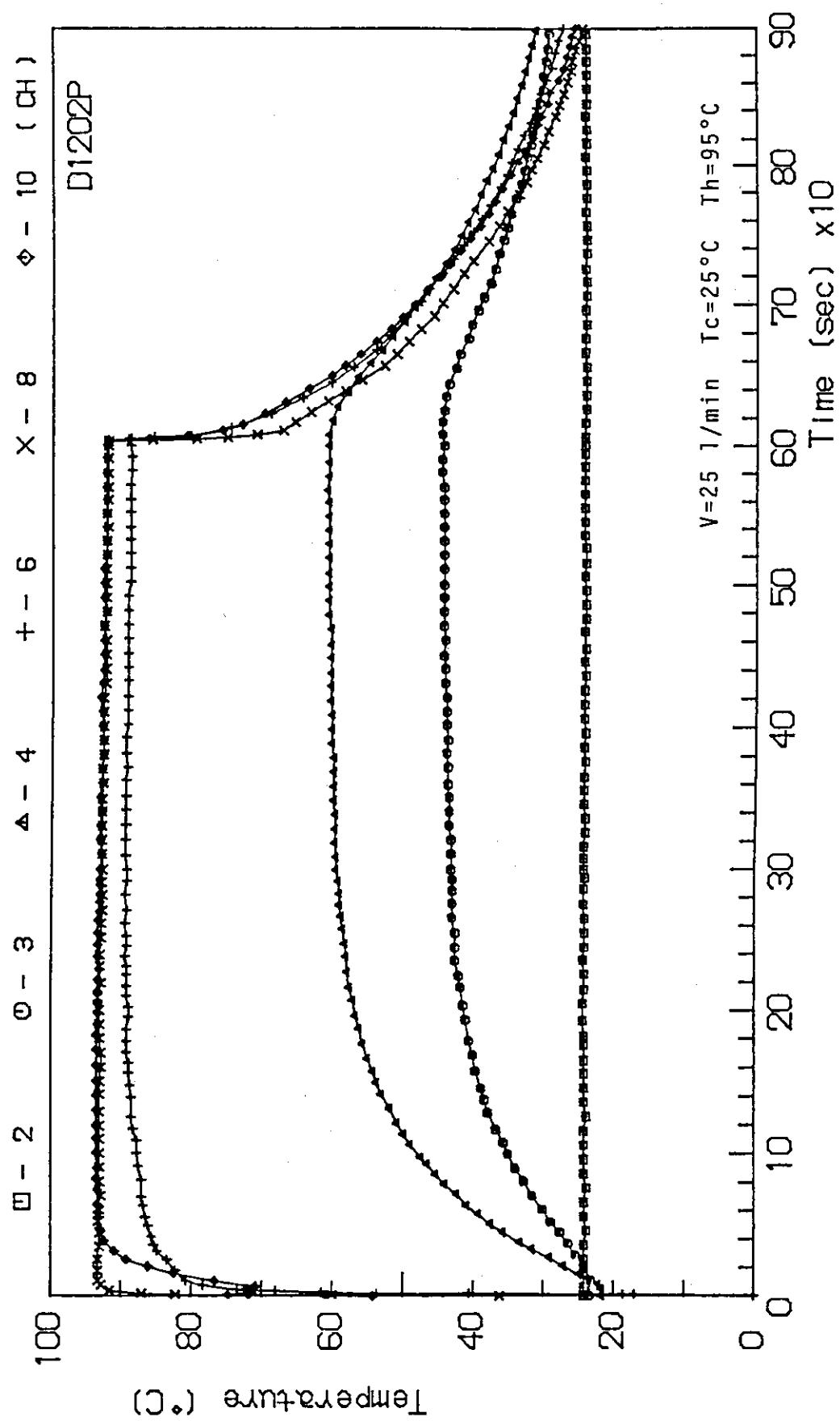


Fig. 3.5(3) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

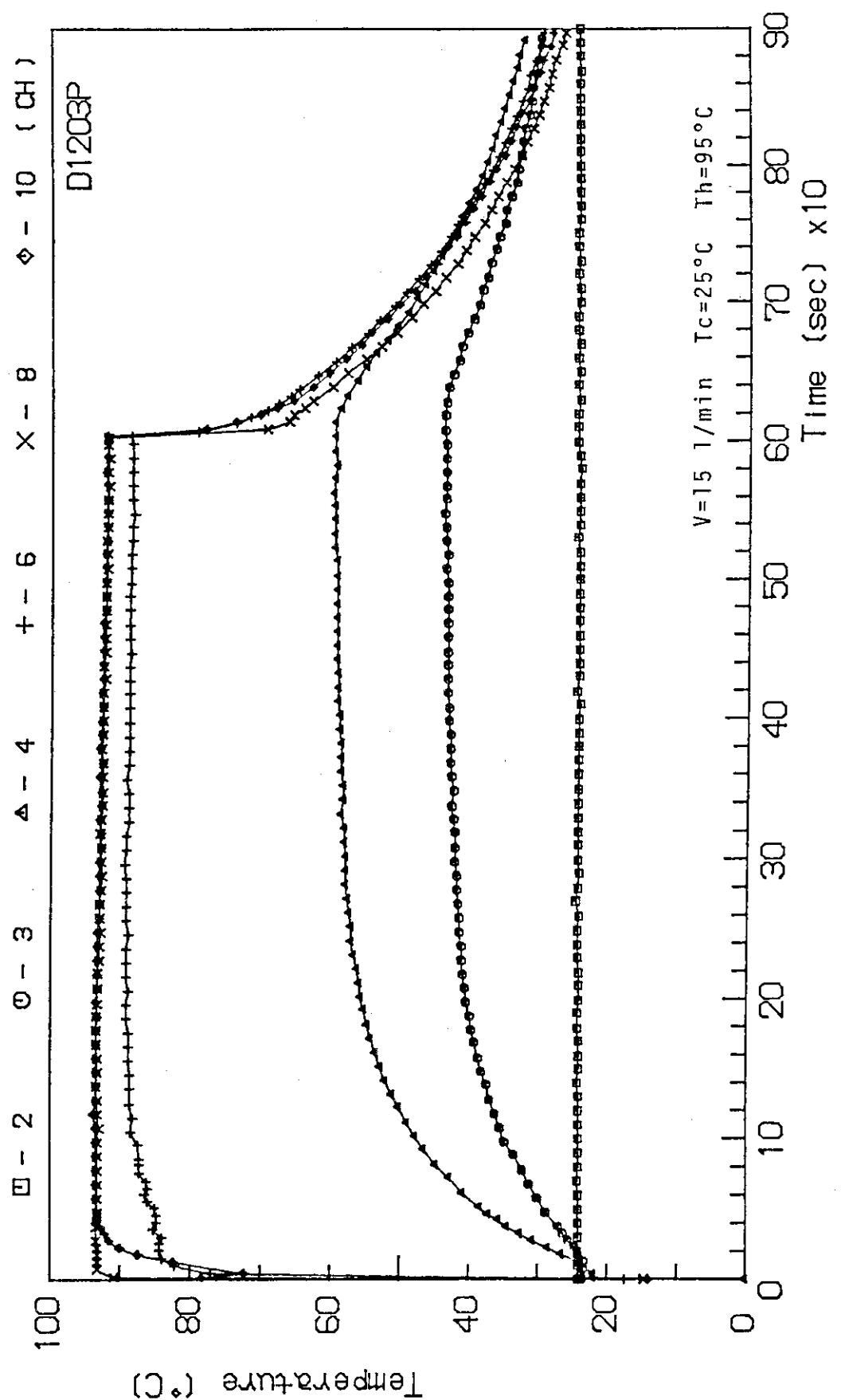


Fig. 3.5(4) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

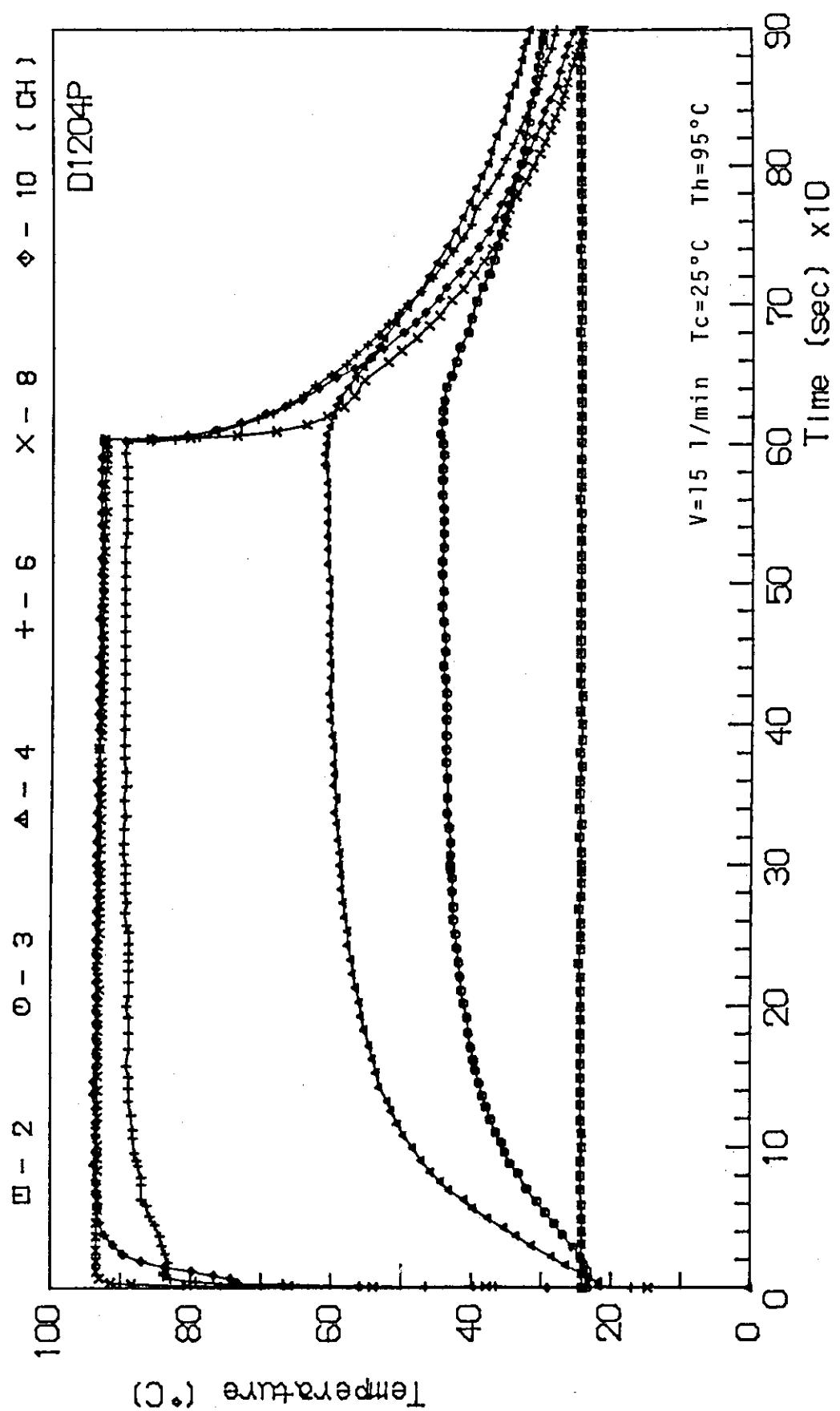


Fig. 3.5(5) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

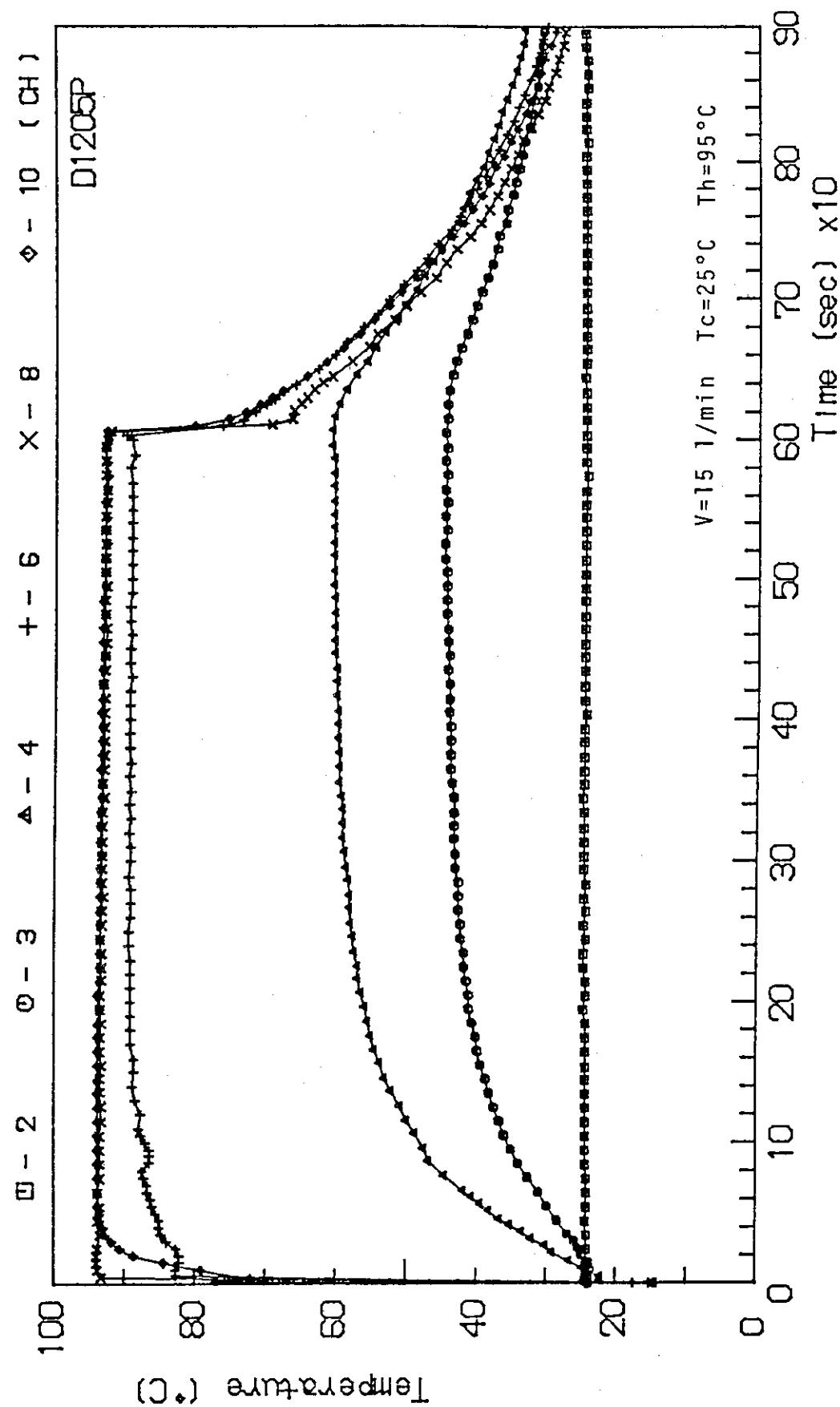


Fig. 3.5(6) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 15 l/min)

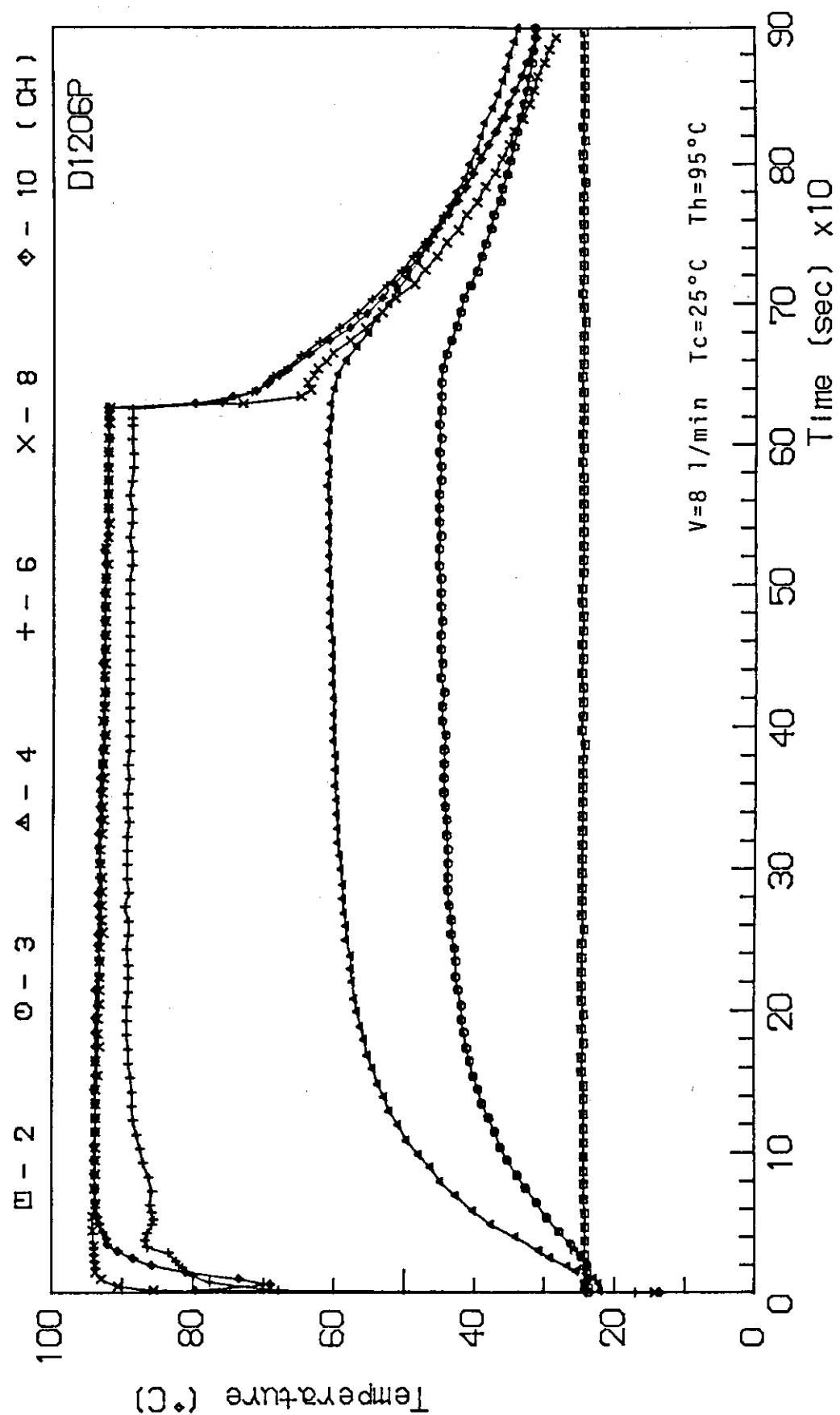


Fig. 3.5(7) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

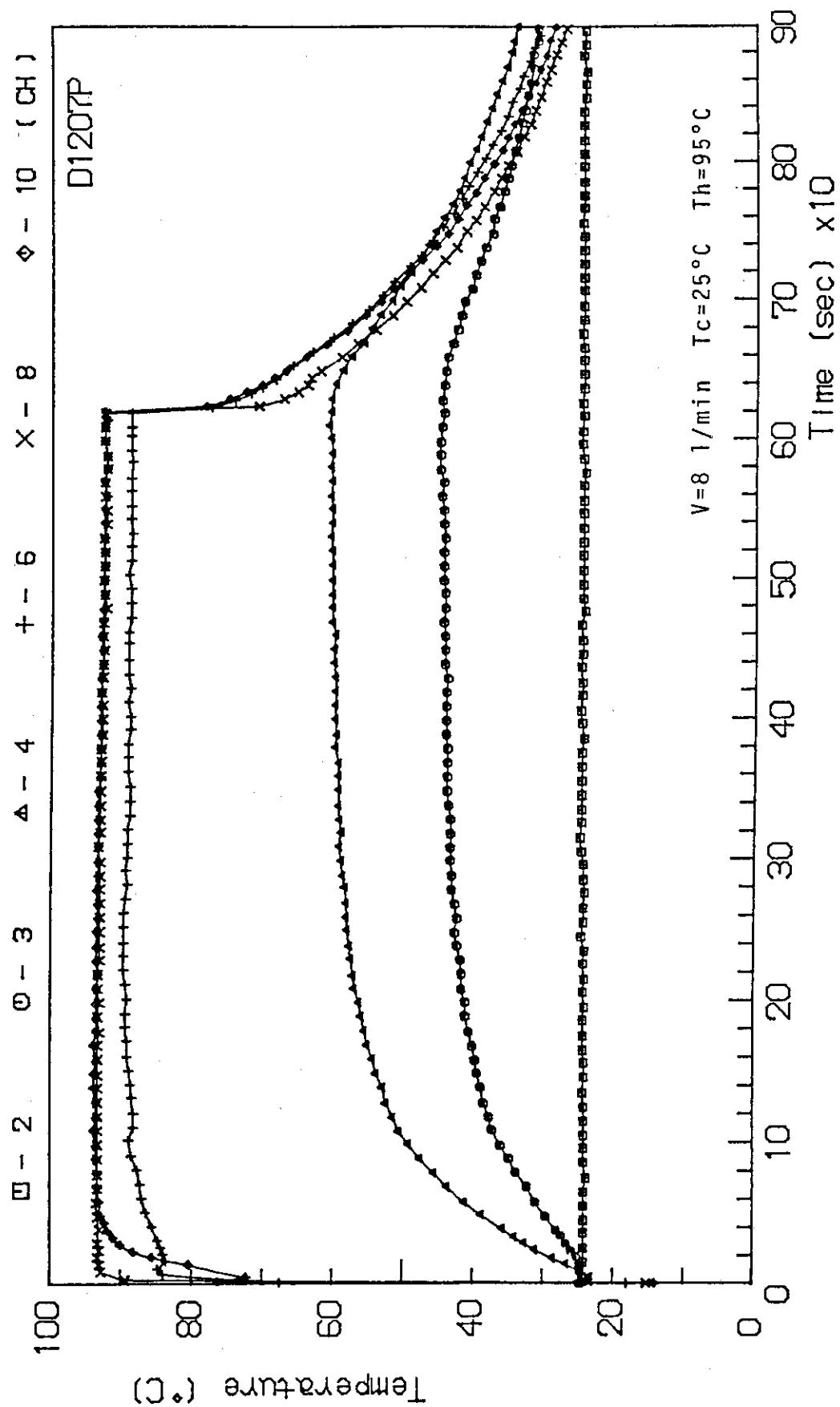


Fig. 3.5(8) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 8 l/min)

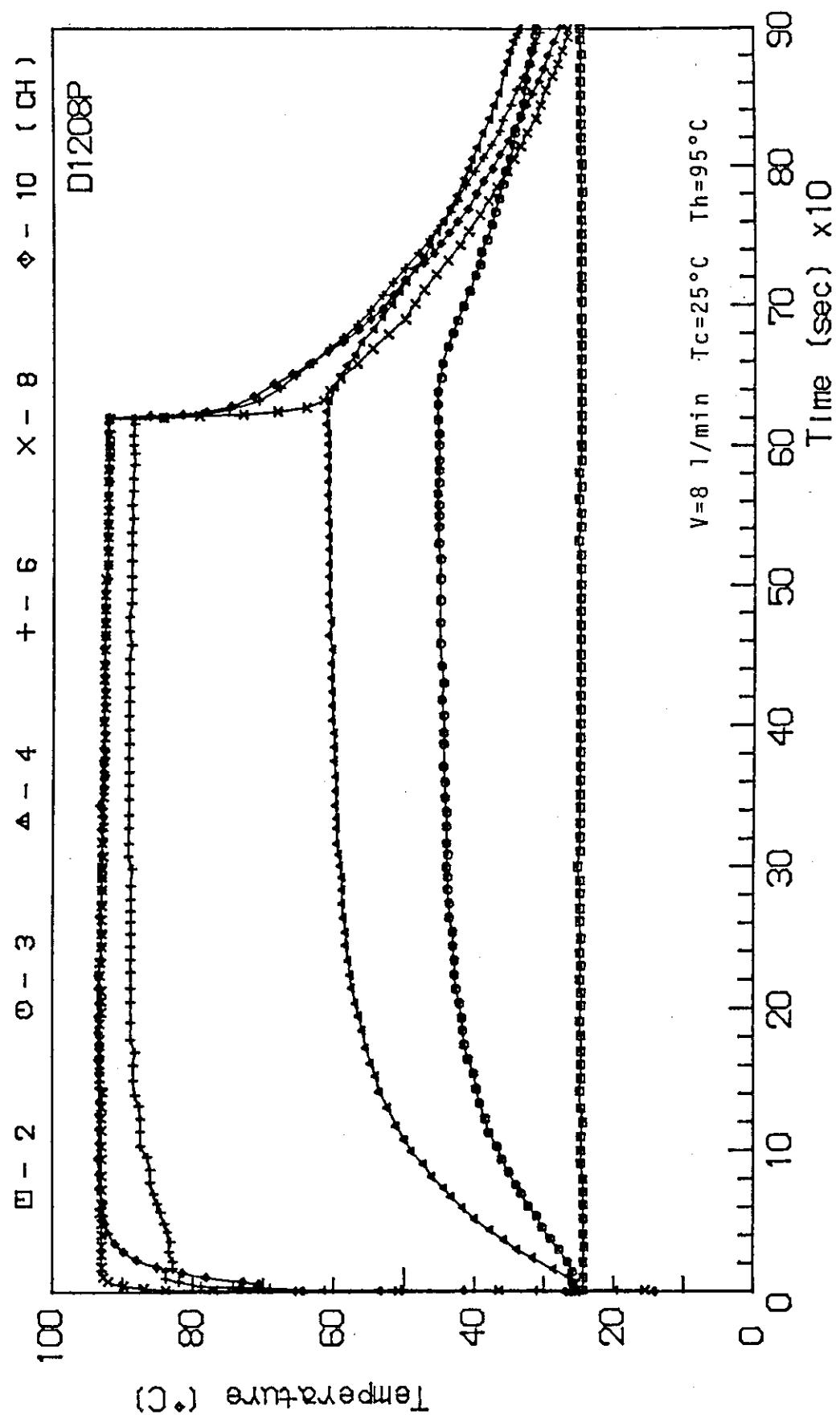


Fig. 3.5(9) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 95°C , Coolant temp. $\approx 25^{\circ}\text{C}$
and Coolant flow rate = 8 l/min)

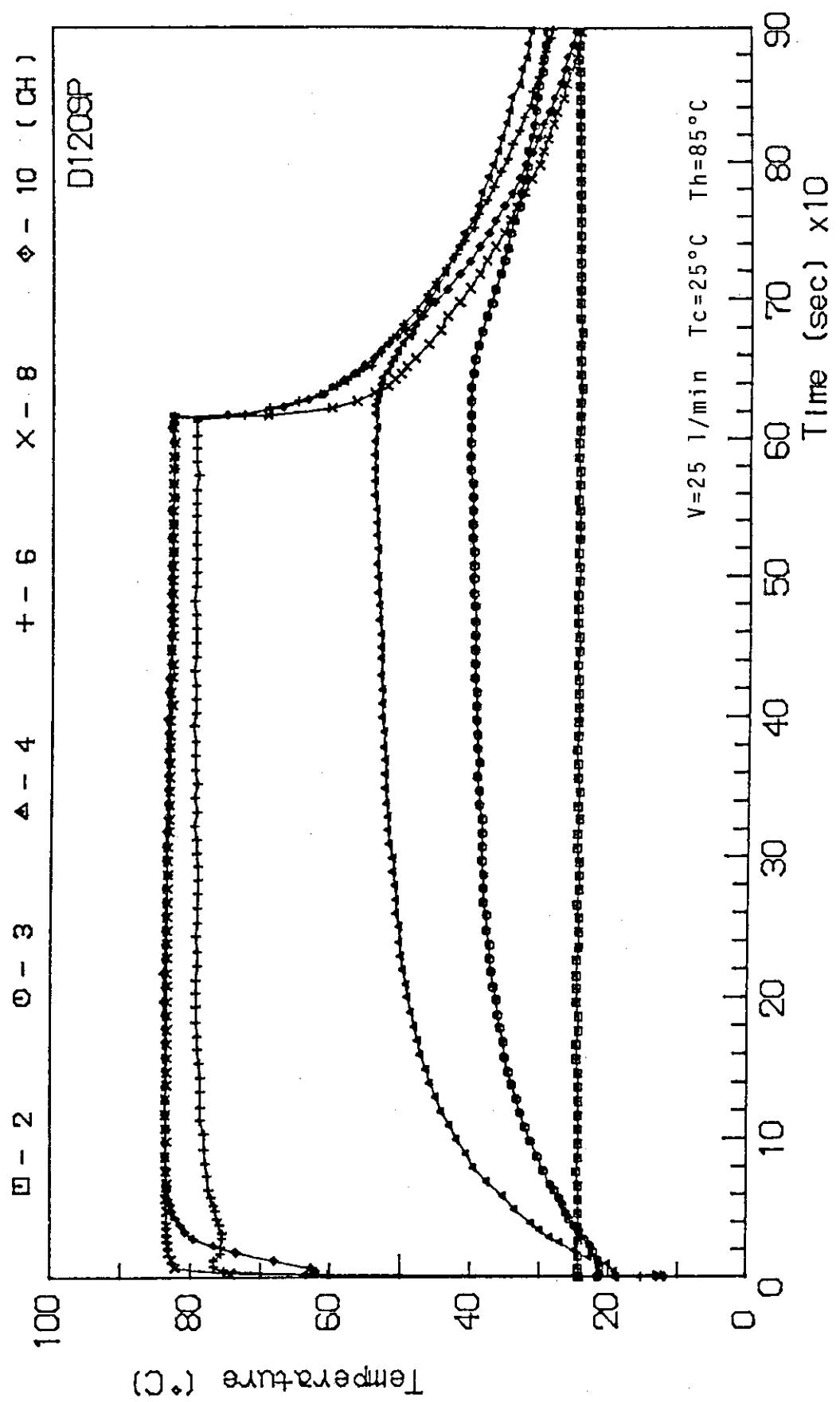


Fig. 3.5(10) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

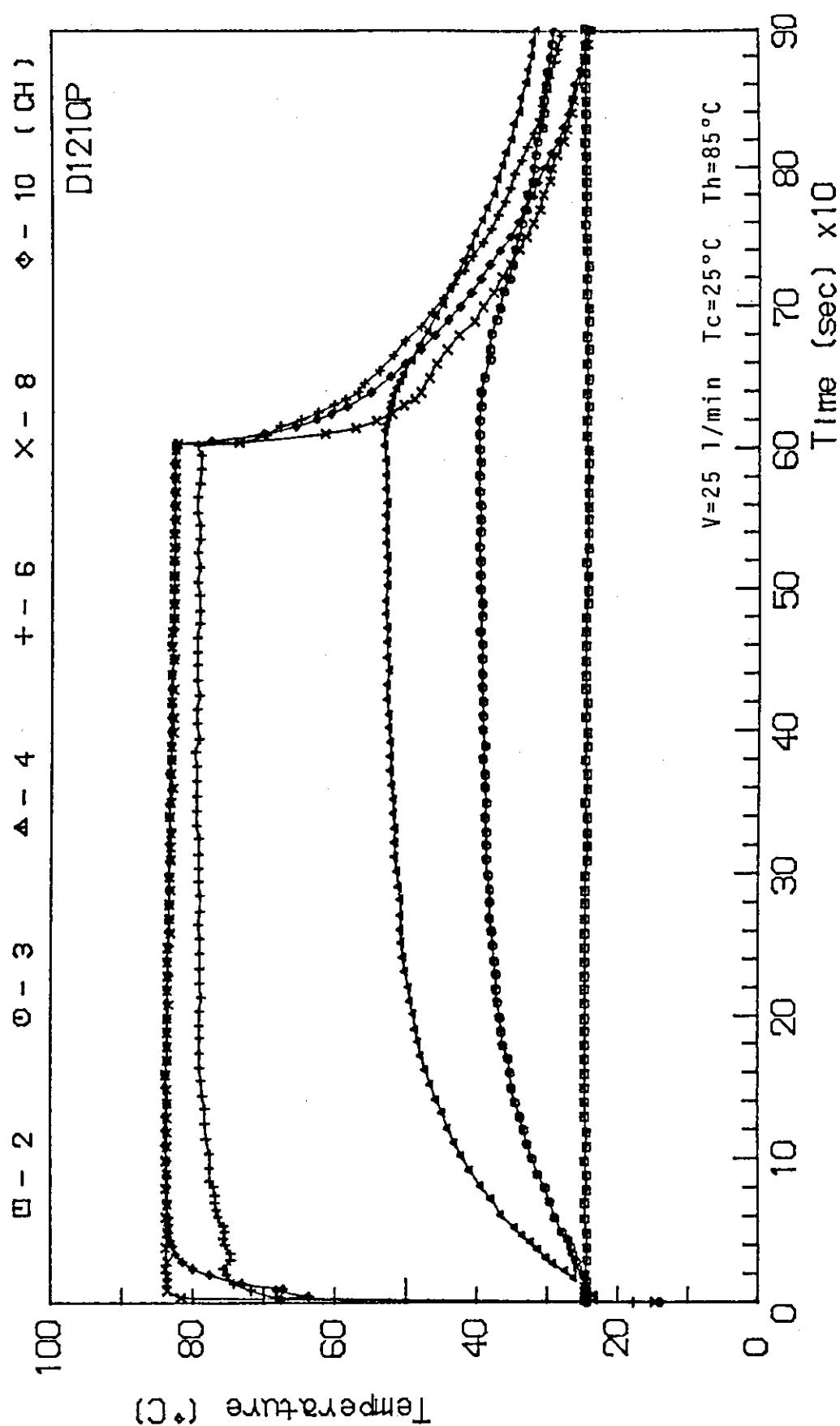


Fig. 3.5(11) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 85°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

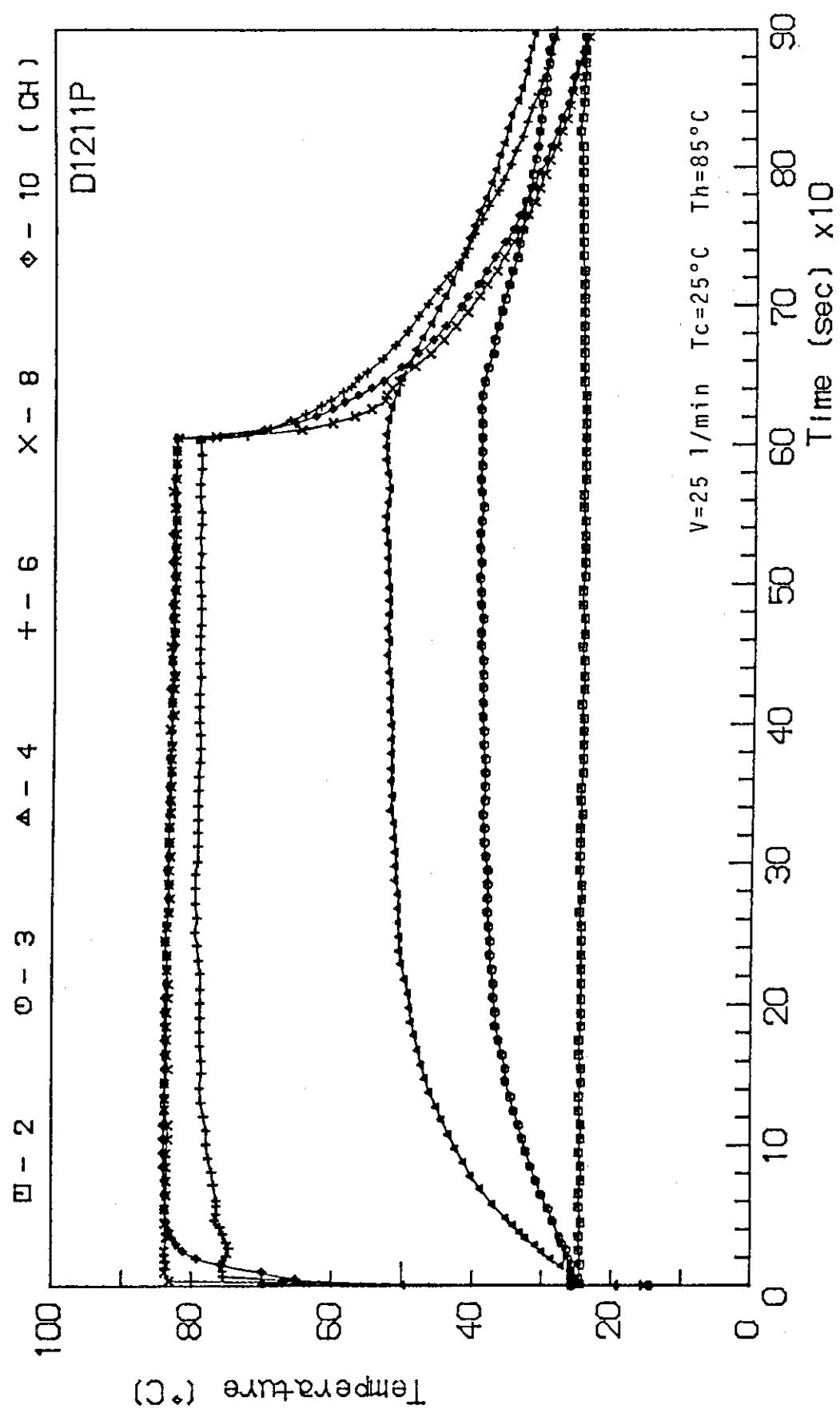


Fig. 3.5(12) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 85°C, Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

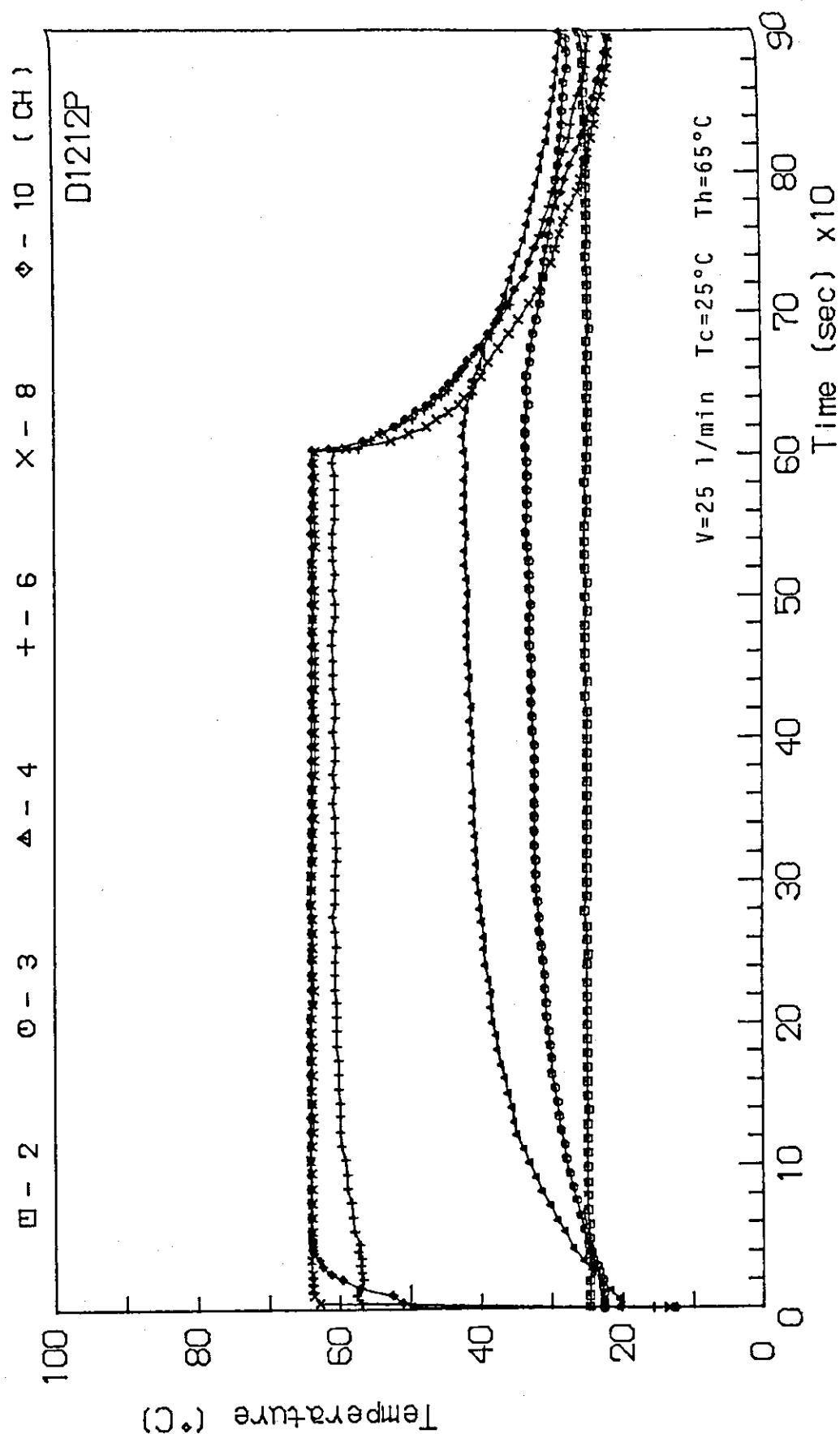


Fig. 3.5(13) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

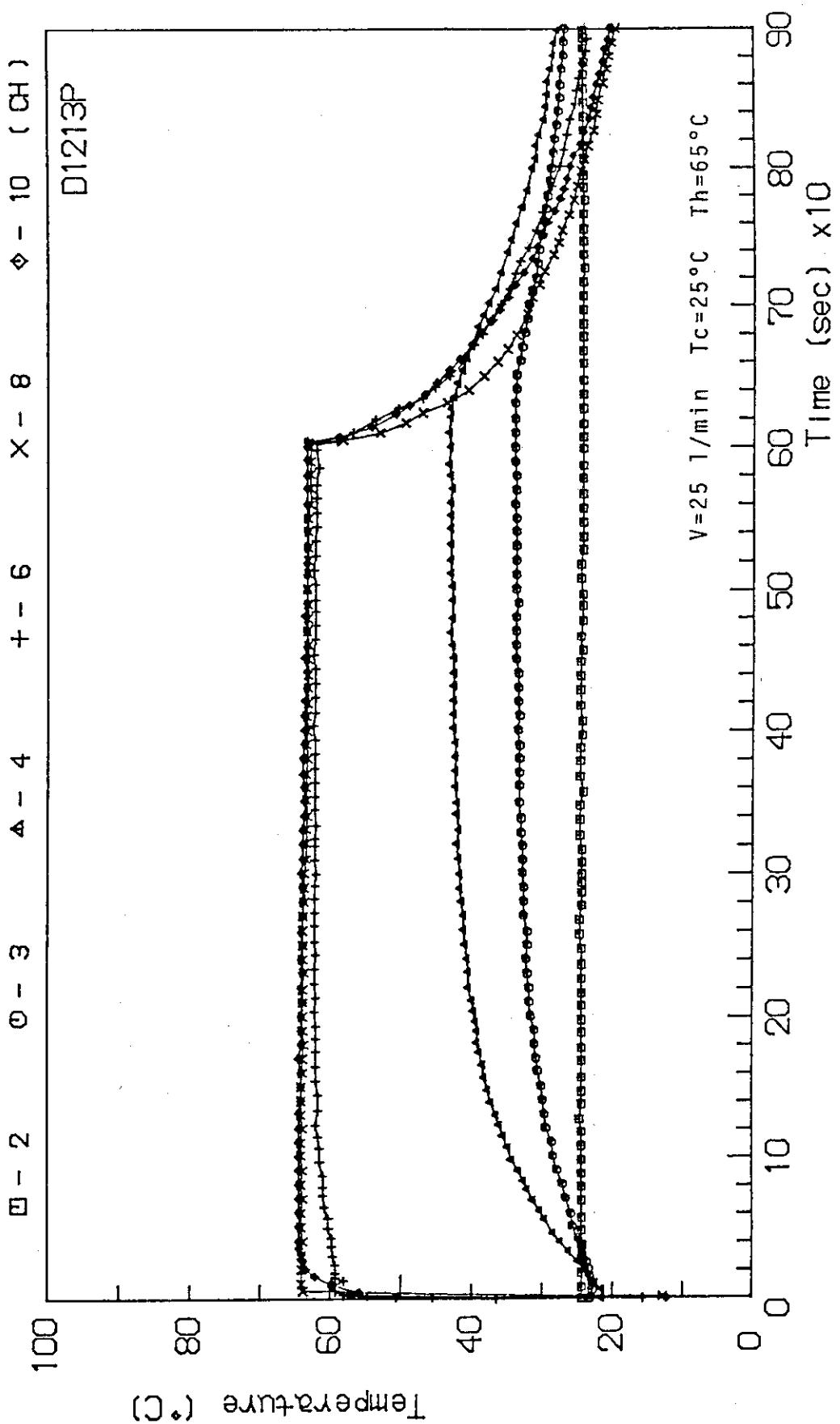


Fig. 3.5(14) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

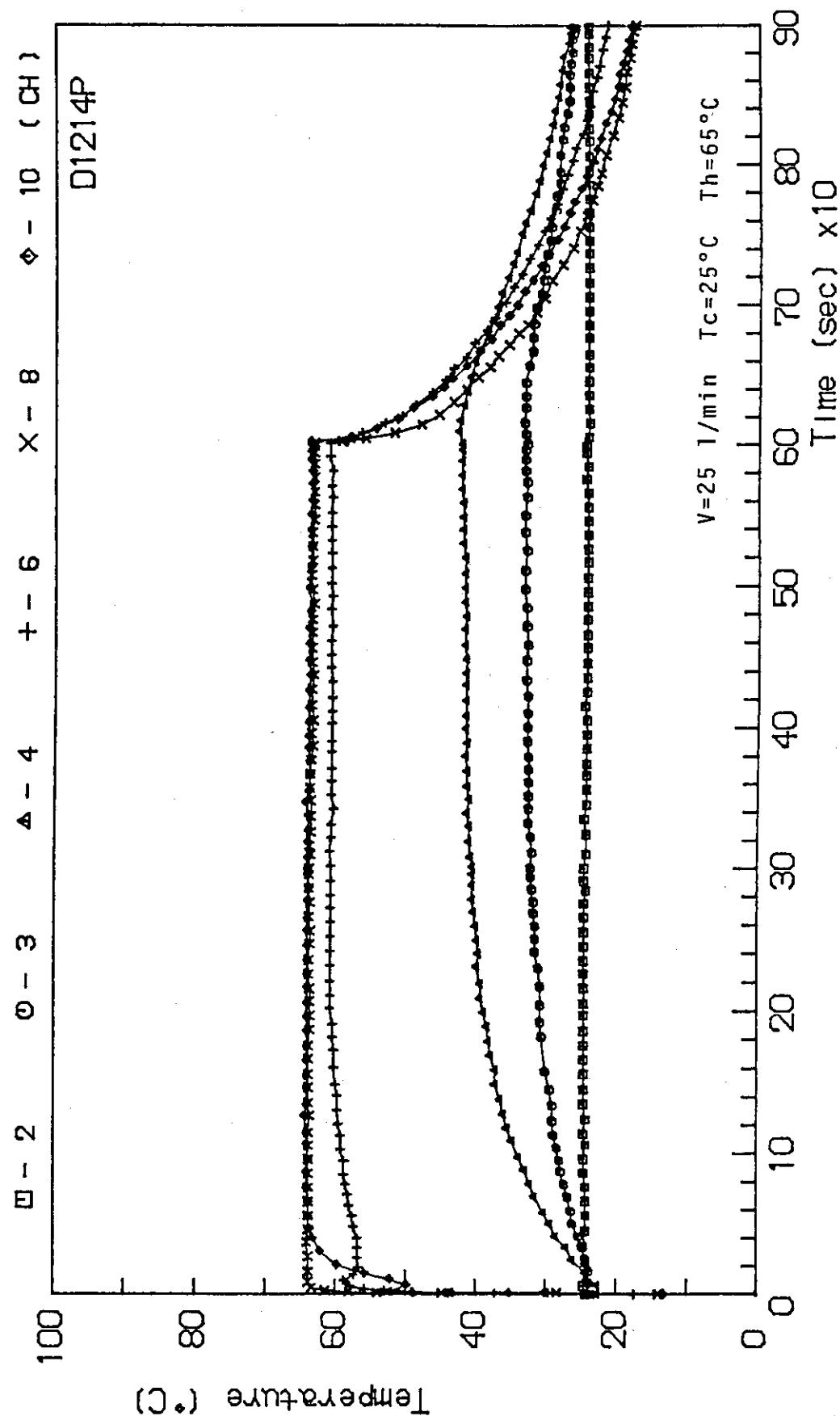


Fig. 3.5(15) Wall temperature of variable conductance heat-pipe
(Bath temp. = 65°C , Coolant temp. = 25°C
and Coolant flow rate = 25 l/min)

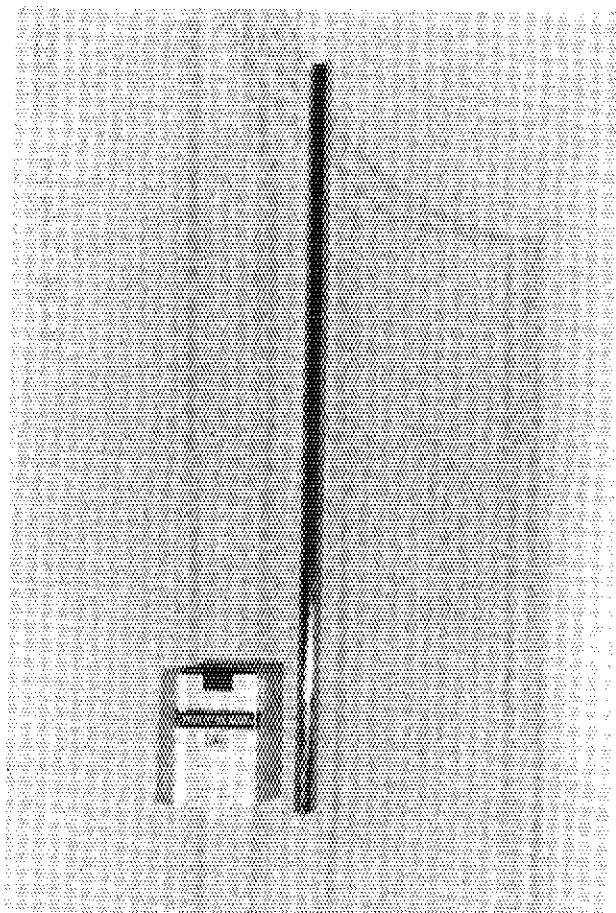


Photo. 3.1 Gravity assisted heat-pipe and
variable conductance heat-pipe

4. 結論

<ウイック式ヒートパイプ>

- (1) 本形状のヒートパイプの過渡変化に関する応答時間は、加熱部約4秒、断熱部約15秒、冷却部約18秒である。
- (2) 本ヒートパイプの熱伝導率は最大で $7720 \text{ kcal}/\text{hm}^{\circ}\text{C}$ 、また温度伝導率は最大で $8.7 \text{ m}^2/\text{h}$ となり、銅の約20倍の値を示した。
- (3) 凝縮部の温度は、冷却水量の減少に伴い上昇する。
- (4) 加熱部の温度は、冷却水量には依存しない。

<熱サイフォン式ヒートパイプ>

- (1) 本形状のヒートパイプの過渡変化に関する応答時間は、加熱温度が高温の場合、加熱部、断熱部、冷却部とも約3秒程度であるが、加熱温度が低温の場合は、加熱部約6秒、断熱部約8秒、冷却部約4秒である。
- (2) 加熱温度が高温 (95°C) の場合、ヒートパイプの温度は沸騰開始後、定常化する。
- (3) 加熱温度が中温 ($85\sim90^{\circ}\text{C}$) の場合、10~60sec程の周期で突沸現象が現れる。
- (4) 加熱温度が低温 ($65\sim75^{\circ}\text{C}$) の場合、ヒートパイプ各部はなだらかな温度変化となる。
- (5) 加熱温度一定で、冷却水量を変化させると、冷却水量の減少にともない沸騰開始時間が遅れる。
- (6) 冷却水量一定で、加熱温度を変化させると、加熱温度の低下にともない顕著な沸騰現象がみられなくなる。
- (7) 突沸現象が現れると、実験の再現性が著しく低下する。
- (8) 突沸の周期は、加熱温度、冷却水量のどちらにも依存しない。
- (9) 突沸開始時間は、加熱温度に依存する。
- (10) VCHPの実験は、内部圧力が高くて、伝熱面の一部でしかヒートパイプとして働くかなかつたと推定できる。

謝 辞

本研究を行うに当たり、茨城大学工学部の益子一郎先生及び照射第1課長市橋芳徳氏に、御協力いただいた。感謝します。

参 考 文 献

- 1) 大島耕一, 松下 正, 村上正秀, 「ヒートパイプ工学」, 朝倉書店, (1979).
- 2) 山西哲夫, 清水定明, 「ヒートパイプとその応用」, オーム社, (1980).
- 3) 岡本芳三, 神永文人, "ヒートパイプによる熱利用技術", 東京大学原子力工学研究施設
固有安全炉システム研究会 1988年3月.
- 4) 露崎典平, 斎藤 隆, 菊田 誠, 根岸完二, 岡本芳三, "宇宙原子炉へのヒートパイプの
応用", 日本ヒートパイプ協会報 vol. XⅢ, (1986).

謝 辞

本研究を行うに当たり、茨城大学工学部の益子一郎先生及び照射第1課長市橋芳徳氏に、御協力いただいた。感謝します。

参 考 文 献

- 1) 大島耕一, 松下 正, 村上正秀, 「ヒートパイプ工学」, 朝倉書店, (1979).
- 2) 山西哲夫, 清水定明, 「ヒートパイプとその応用」, オーム社, (1980).
- 3) 岡本芳三, 神永文人, “ヒートパイプによる熱利用技術”, 東京大学原子力工学研究施設
固有安全炉システム研究会 1988年3月.
- 4) 露崎典平, 斎藤 隆, 菊田 誠, 根岸完二, 岡本芳三, “宇宙原子炉へのヒートパイプの
応用”, 日本ヒートパイプ協会報 vol. XⅢ, (1986).