技術資料

일방향 제어응고에 의한 대형핵연료 수송용기 제작

박 수 현* 정 신 검*

The Manufacturing of Large Cask for Spent Fuel Transpotation by Unidirectionally Controlled Solidification

S. H. Park,* S. K. Chung*

두께 160mm, 길이 4500mm의 사각 단면을 갖는 사용 후 핵연료 수송용기를 제작하기 위하여 스텐레스강의 철피와 철피사이에 납을 주조한 후 전기히타로 철피외면을 둘러싸고 히타를 상승(Withdrawal)함으로써 일방향 제어응고에 의한 건전한 주조를 얻을 수 있었다.

이때, 히타 상승속도와 응고선단의 이동속도를 수치해석하여 실제품에 적용한 결과 히타 상승속도를 5.0㎜/min으로 하고 표면을 자연냉각, 내면은 압축공기를 35N㎥/min으로 하였을때 균일한 일방향 응고를 얻을 수 있었고, 또한 수치해석 결과와 측정치가 잘 일치함을 확인하였다.

1. 서 론

원자력 발전소의 사용후 폐기 핵연료(Spent Fuel)의 수송용기(Cask)는 감마선(γ-ray)차폐효과와 중성자(Nutron) 차폐효과를 엄격히 규제하고 있으므로 납 차폐체의 주조건전성(Casting Soundness)에 대하여는 고품질(High Quality)이 요구된다.

즉, 두께가 160mm, 높이 4500mm의 납주조 차폐체 내부에 개재물이나 기포 등 어떤 결함도 허용되지 않으며 특히, 구조물인 스테인레스강 철피(Shell)와 철피 사이에 납을 주조하여 응고 및 냉각후 납 차폐체와 철피간의 空隙(Air Gap)이 최대 2mm 이내이어야 하는 엄격한 제한이 있다.

이상의 품질 조건을 만족시키기 위하여 철피주위에 전기히타로 둘러싸고 일정한 온도하에서 균일하게 예열한 후 납을 주입하고 전기히타 상승속도에 따른 응고 선단(Solidification Front)을 수치해석하여 구한 속도로 전기히타를 일정하게 상부로 인상(Withdrawal)하여 바닥에서 종방향으로 응고를 진행시켰다.

또한 응고시 수송용기 내면과 외면의 철피 온도를 측정하여 수치해석으로 구한 값과 비교하였다.

2. 주조 및 온도측정 실험방법

2.1 납의 용해

표 1에서와 같은 순도 99.9% 鉛傀를 그림 3 및 그림 1에서 보는 바와 같은 철 도가니(Steel Crucible)에서 경유 버너를 사용하여 용해하였다. 용해후 420℃에서 Flux로 탈 Gas 처리를 하고 진정시킨 후 주형에 주입하였다.

2.2 주 입

스텐레스강 철피의 주형을 전기히터를 사용하여 주형의 표면온도가 균일하게 400℃로 유지되도록 예열하였다. 또한 주입직전 주형내부는 용탕

표 1. 鉛塊의 화학성분

Chemical Composition	Ag	Cu	Bi	Fe	Sn	As	Sb	Pb
Wt(%)	Tr.	0.005 Max.	0.010	0.008	0.005 Max.	Tr.	Tr.	Bal.

* 대신금속주식회사

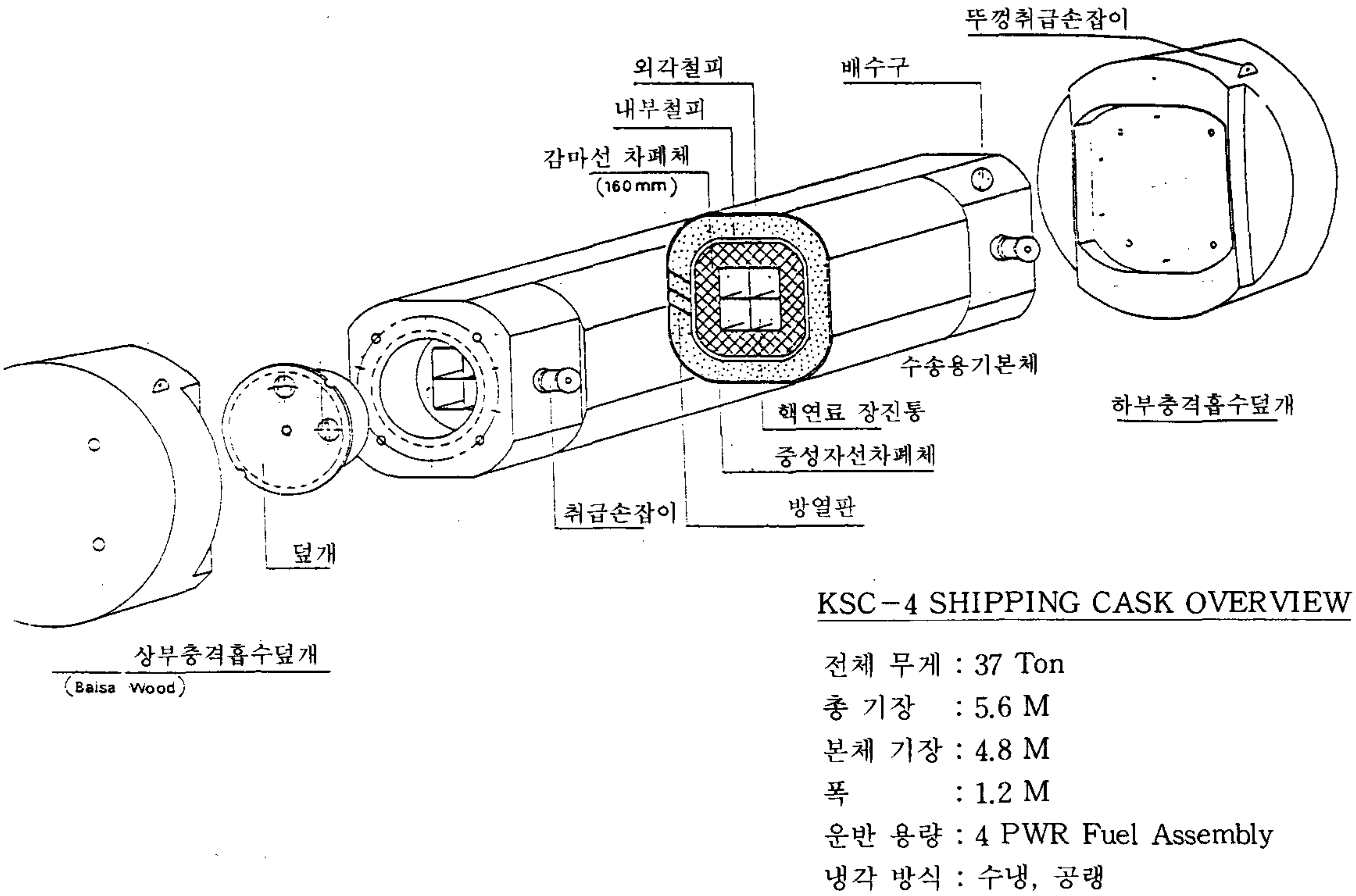


그림 1. KSC-4 사용후 핵연료 수송용기 개략도

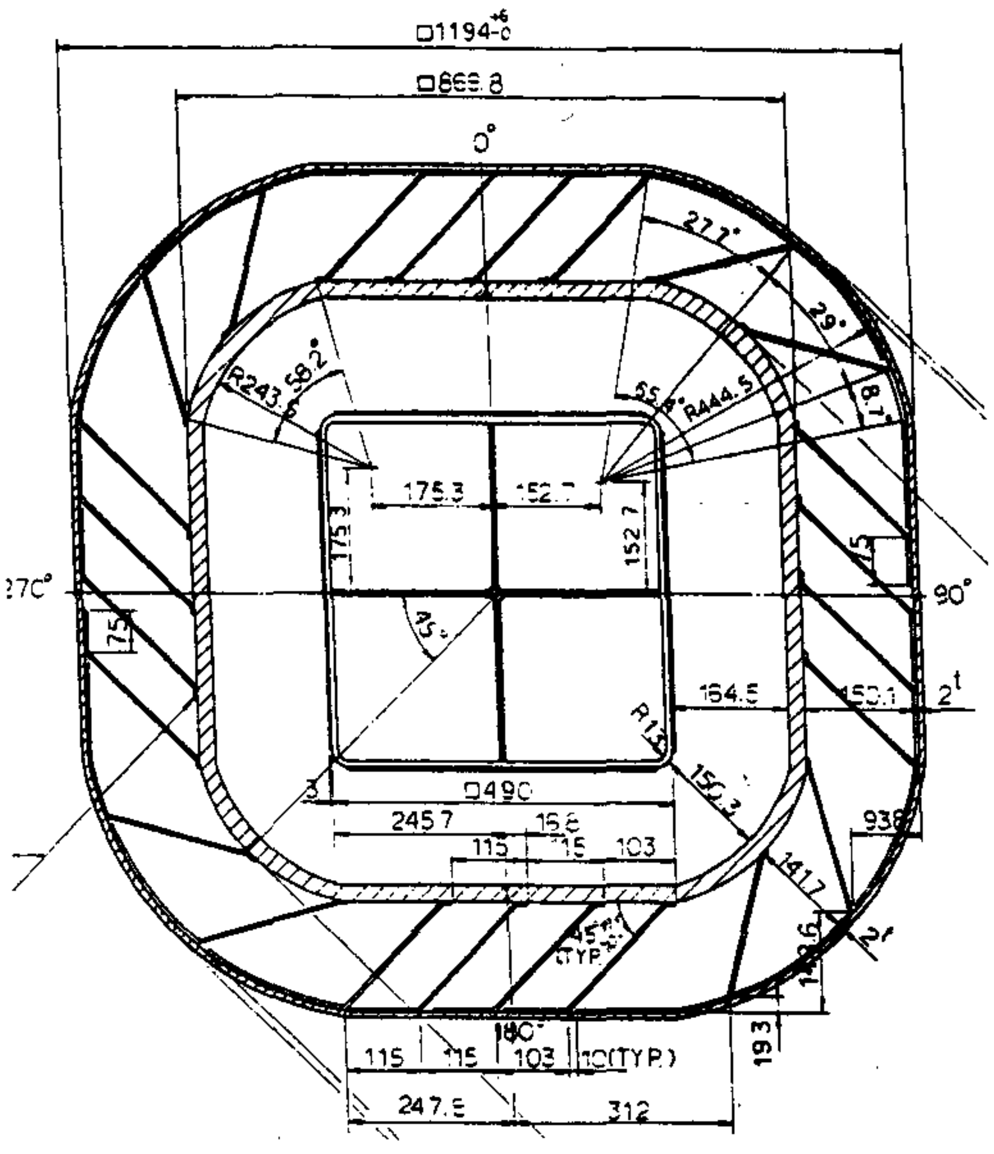


그림 2. KSC-4 사용후 핵연료 수송용기 단면도

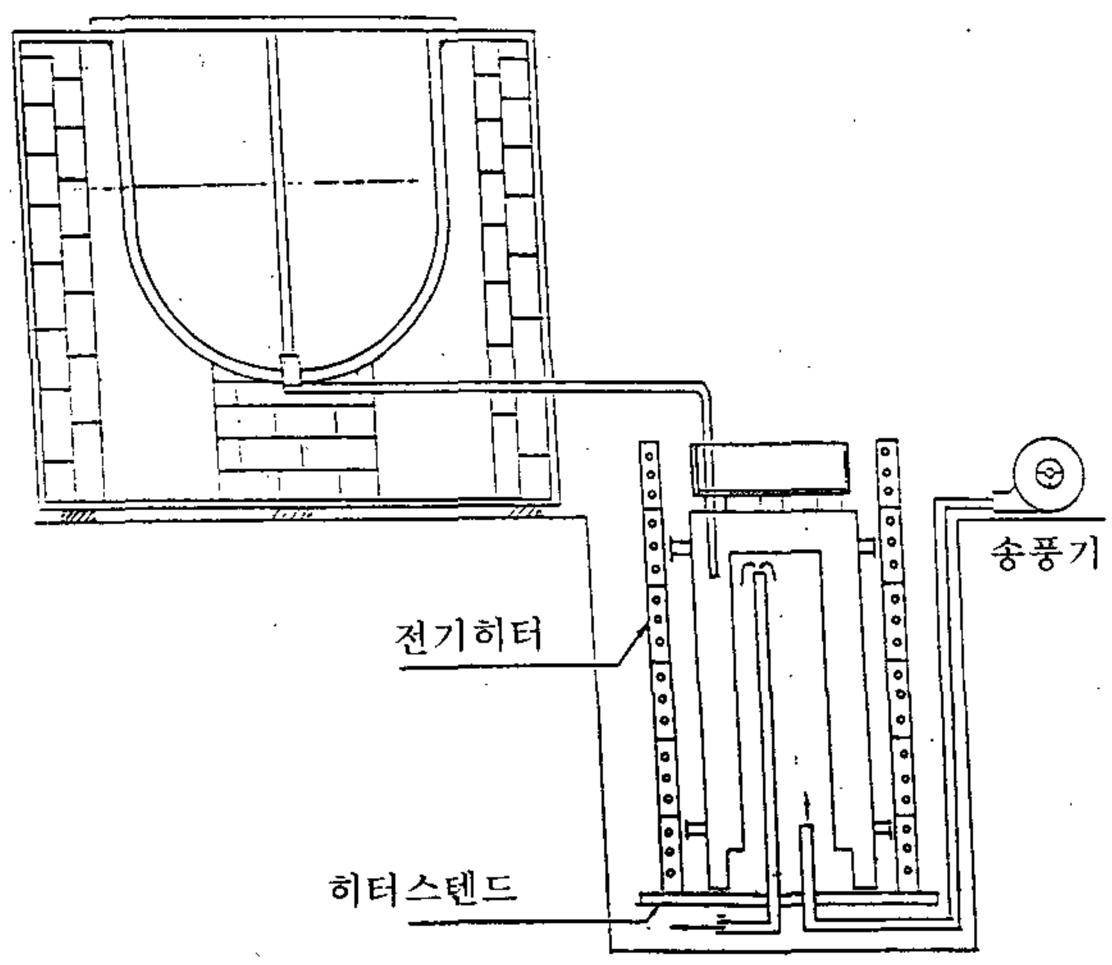


그림 3. 수송용기의 납 주조를 위한 용해로 배치 및 주조방법

산화방지를 위하여 알곤 개스를 취입하였다.

2.3 온도 측정

주형내 용탕주입이 완료된 후 5분간 진정시켜

주입시 발생한 비금속 개재물이 충분히 부상되도록 한 후 일방향 제어응고를 실시하였다. 이때 각 부위의 주형내 용탕온도 제어를 위하여 Fig. 4에서와 같이 주형내, 외부 표면에 축방향으로 매 400mm마다 CA(Chromel-Alumel) 열전대를 부착하였고 Digital Thermo-recorder로 22 Points의 온도를 측정하였다.

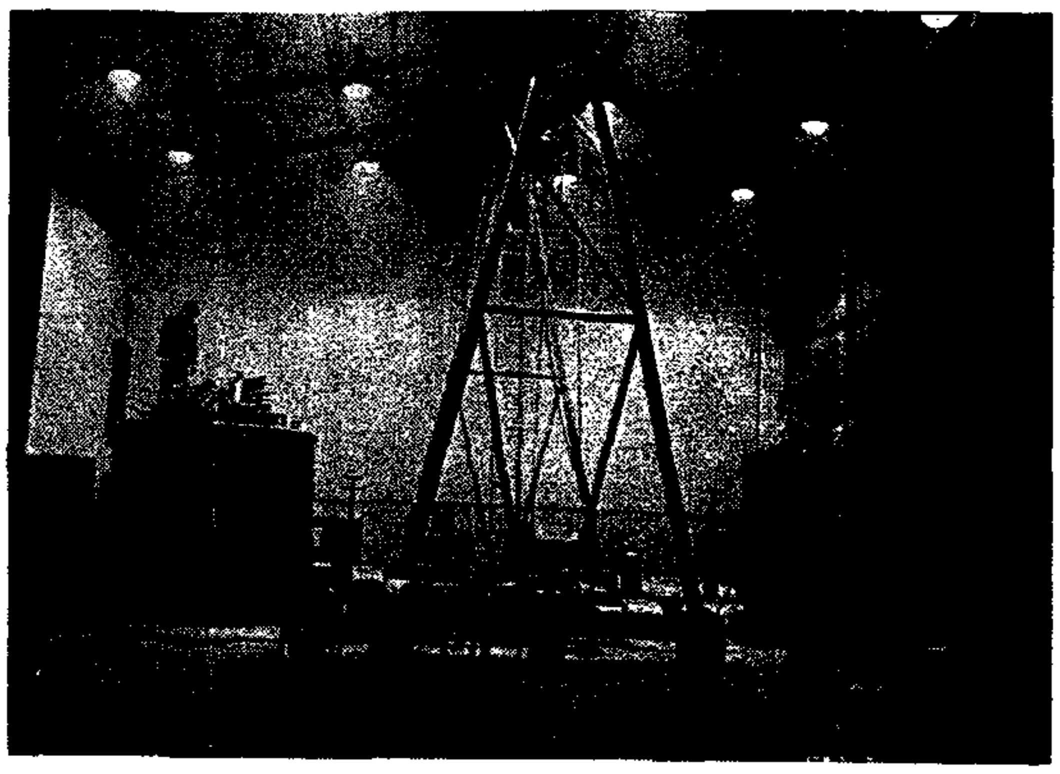


사진 1. 납주조를 위한 용해로 배열 사진

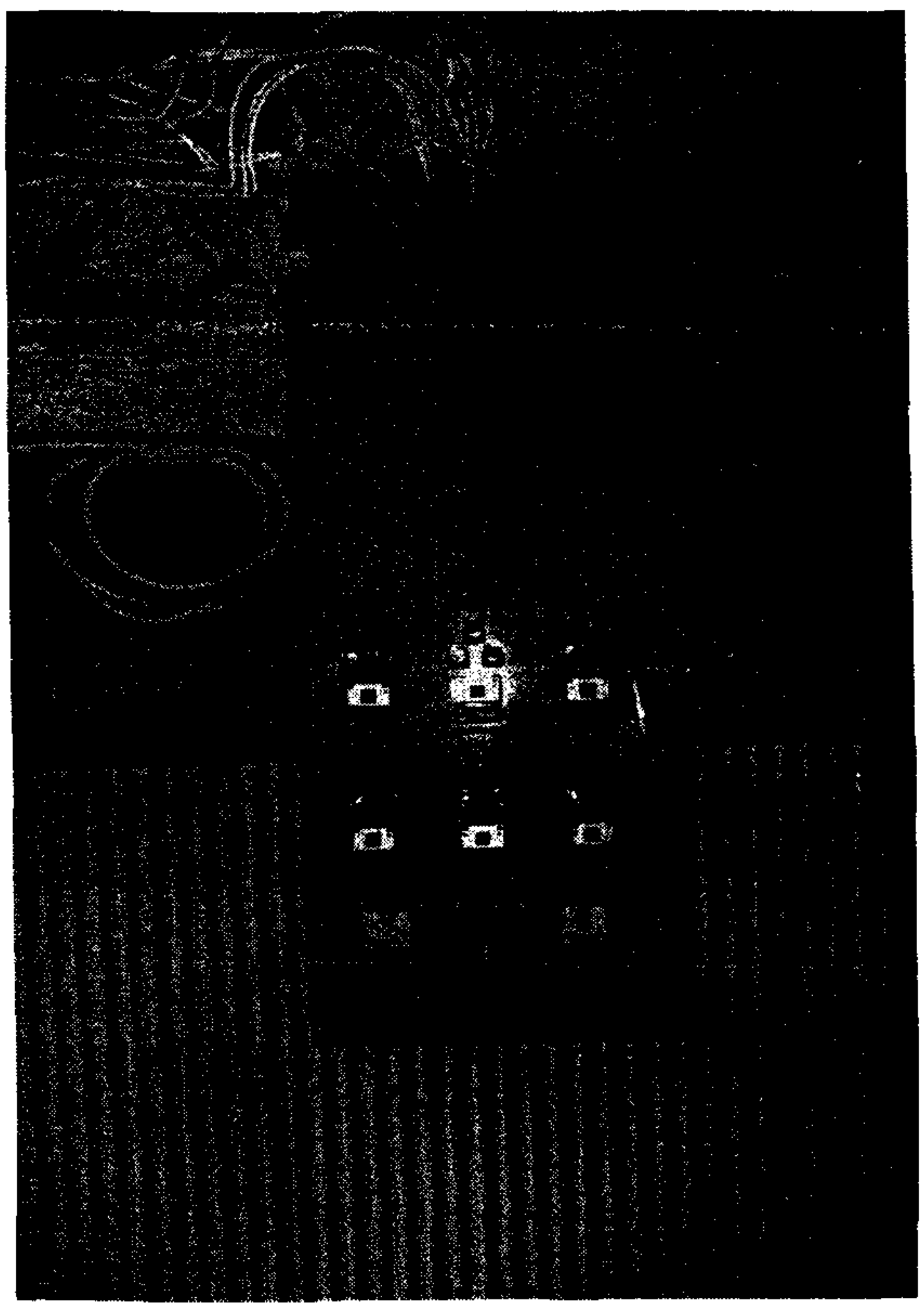


사진 2. 일방향 제어응고를 위한 제어장치

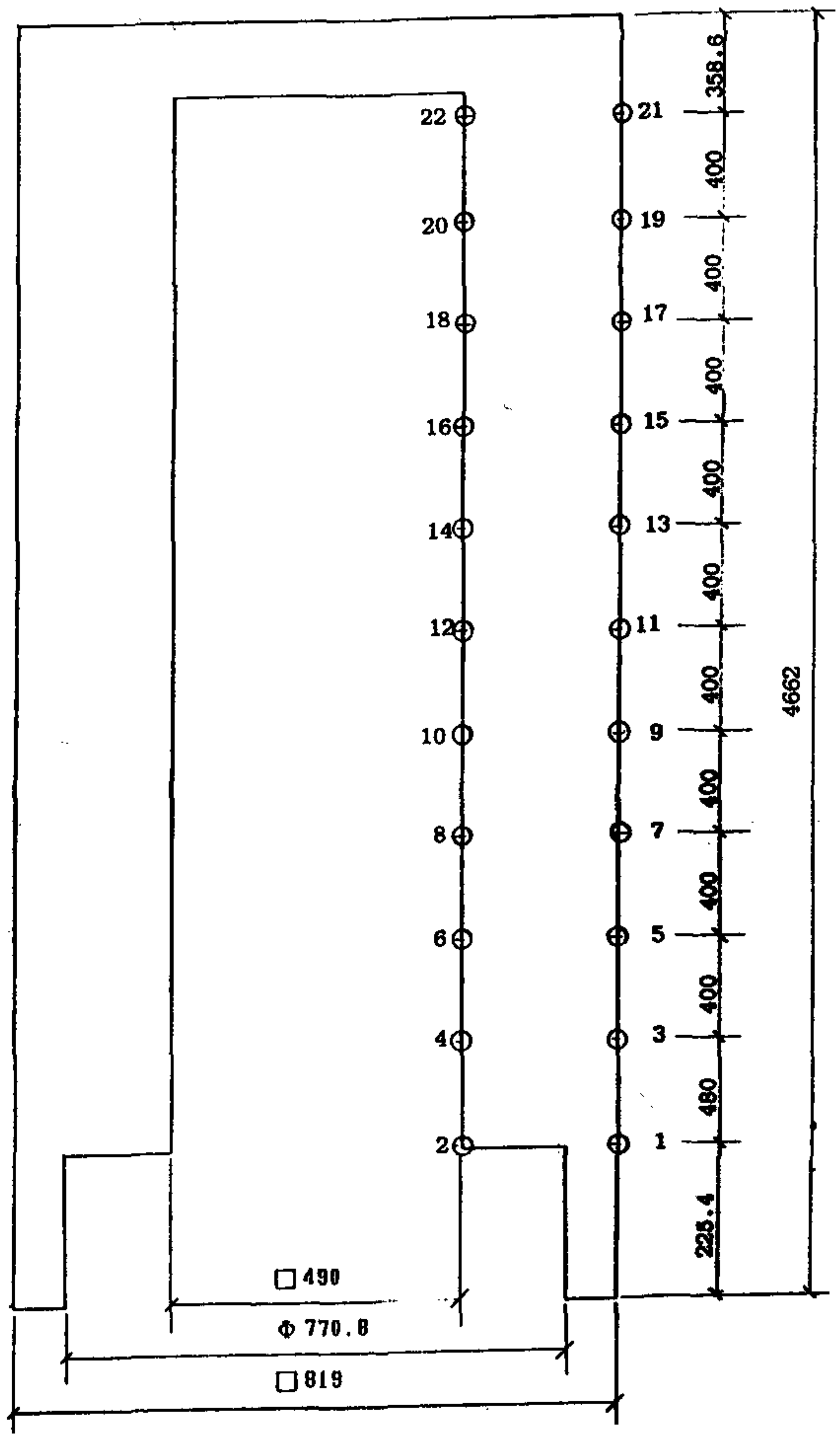


그림 4. 일방향 제어응고시 온도측정을 위한 열전대 배치도

2.4 일방향 응고

사진 3에서와 같이 주형 외부를 전기히터로 둘러싸고 하단에서 응고가 완료되면 상방향으로 Withdrawal시켜 하단에서 상단으로 응고를 진행시켰고 또한 횡 단면에서의 주형 내, 외면 온도 균일화를 기하기 위하여 주형 내면에는 압축공기를 취입하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 수치해석의 이론 고찰

본연구에서 해석하고자 하는 주물의 기하학적 형상은 반 무한판상(半 無限板狀) 주물에 속하며 상부 및 인접면은 단열조건이므로 2차원 열전달

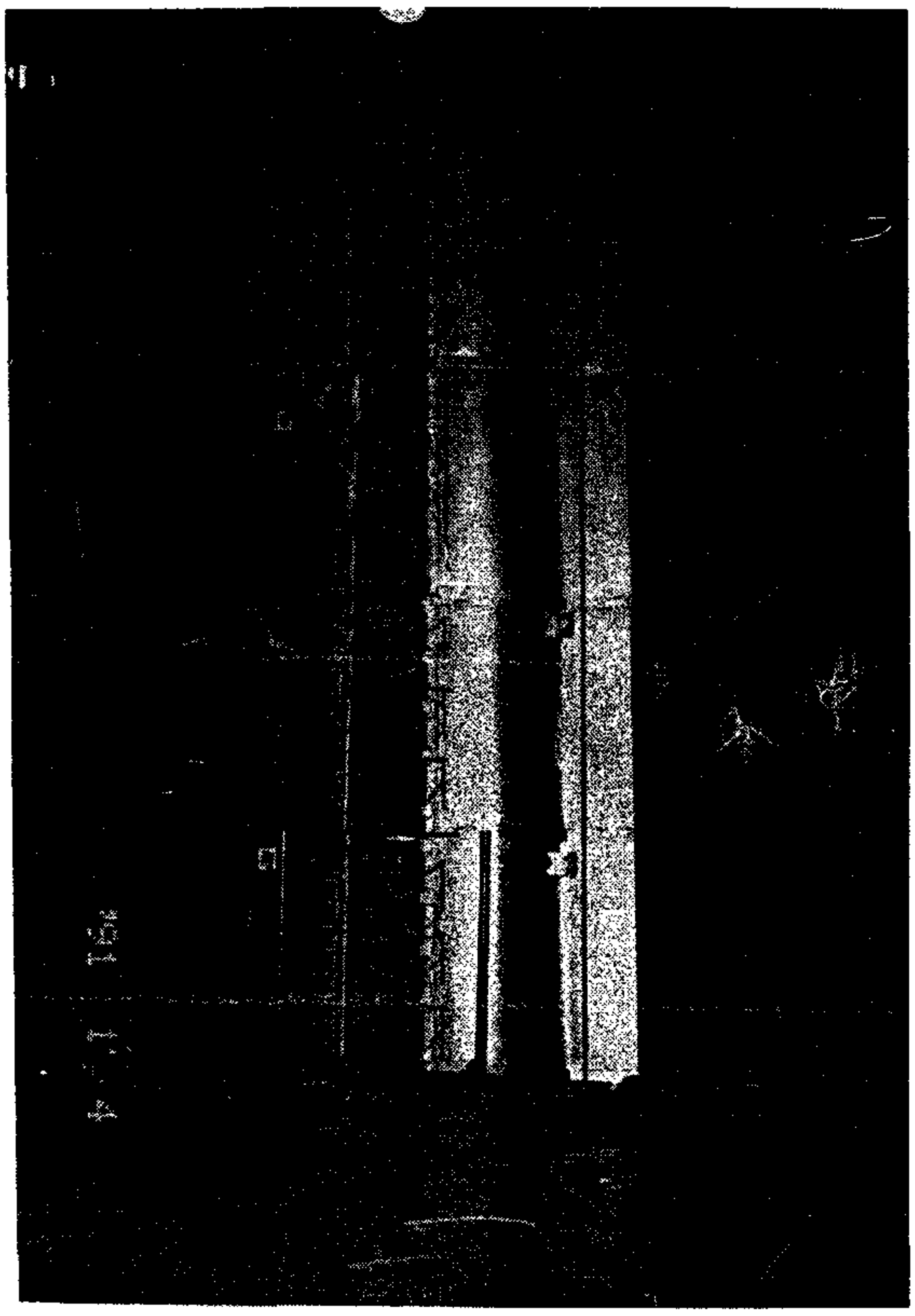


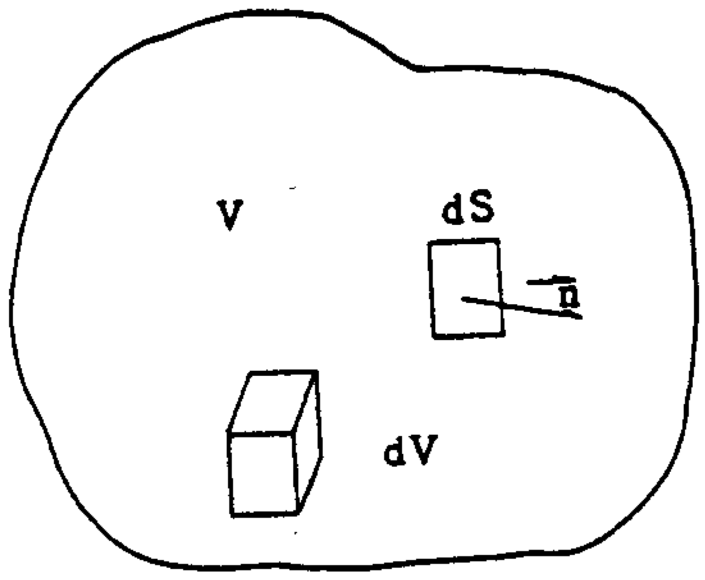
사진 3. 일방향 제어응고에 사용된 전기히터 사진

문제로 도식화(Modeling)할 수 있다. 따라서 온도 및 열 물성치는 X, Z방향으로만 변화하고 Y 방향으로는 변화가 없다고 가정하였다. 즉, 지배 방정식은[1,2]

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial X}(k+\frac{\partial T}{\partial X})+\frac{\partial}{\partial Z}(kz\frac{\partial T}{\partial Z}) \quad \cdots\cdots\cdots(1)$$

여기서 ρ=밀도(g/㎤)
C=비열(cal/g·℃)
k=열전도도(cal/cm·sec·℃)
t=시간(sec)이다

임의의 영역에서 열평형을 생각하면
체적 요소 內의 에너지 증가율 (Q_1)
=체적 요소의 표면을 통과하는 유입에너지 (Q_2)……(2)
로 된다.
式(2)를 수식으로 표시하면 다음과 같다.



V : 해석할려는 체적
S : 해석할려는 면적
dV : 미소 체적 요소
dS : 미소 면적 요소
n : dS의 수직방향 Vector

그림 5. 열량 입출을 해석할려는 체적 및 면적 요소

$$Q_1=\int_v \rho C\ \frac{\partial T}{\partial t}dV \quad \cdots\cdots\cdots(3.a)$$
$$Q_2=\int_s k\ \frac{\partial T}{\partial n}dS \quad \cdots\cdots\cdots(3.b)$$

式 (3.a), (3.b)를 式(2)에 대입하면 열전달 지배방정식은

$$\int_v \rho C\ \frac{\partial T}{\partial t}\cdot dV=\int_s k\ \frac{\partial T}{\partial n}dS \quad \cdots\cdots\cdots(4)$$
로 된다.

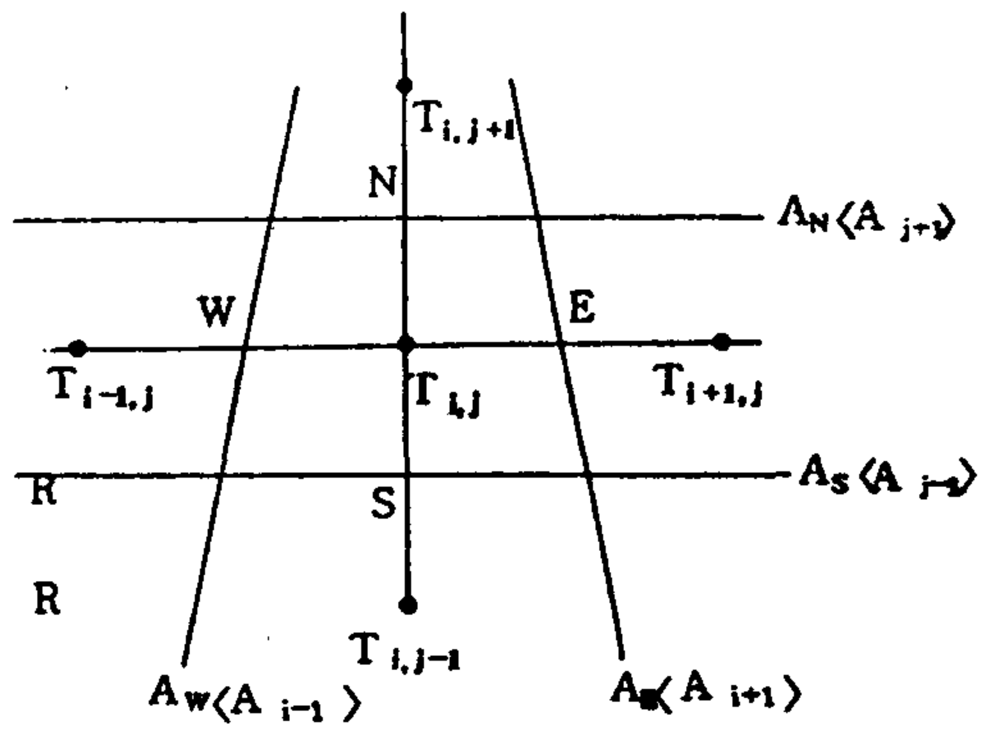


그림 6. 2차원 열전도 문제의 단위요소 분할

한 개의 4각요소 내에서는 온도가 일정하다고 가정하고
式(3.a) (3.b)를 차분화하면[3,4,5]

$$Q_1=\rho C\ \Delta v\frac{\Delta T}{\Delta t} \quad \cdots\cdots\cdots(5.a)$$

$$Q_2=\left[k\frac{\Delta T}{\Delta \ell}A\right]w+\left[k\frac{\Delta T}{\Delta \ell}A\right]e+\left[k\frac{\Delta T}{\Delta \ell}A\right]s+\left[k\frac{\Delta T}{\Delta \ell}A\right]n \quad \cdots\cdots (5.b)$$

여기서

ΔV : 4각요소의 체적

$\frac{\Delta T}{\Delta t}$: 4각요소의 시간에 대한 온도변화율

ΔT : 인접 4각요소와의 온도차

$\Delta \ell$: 인접 4각요소와의 거리

A : 인접요소와 접하는 면적

$\frac{\Delta T}{\Delta \ell}$: 인접4각요소와의 온도구배

이다.

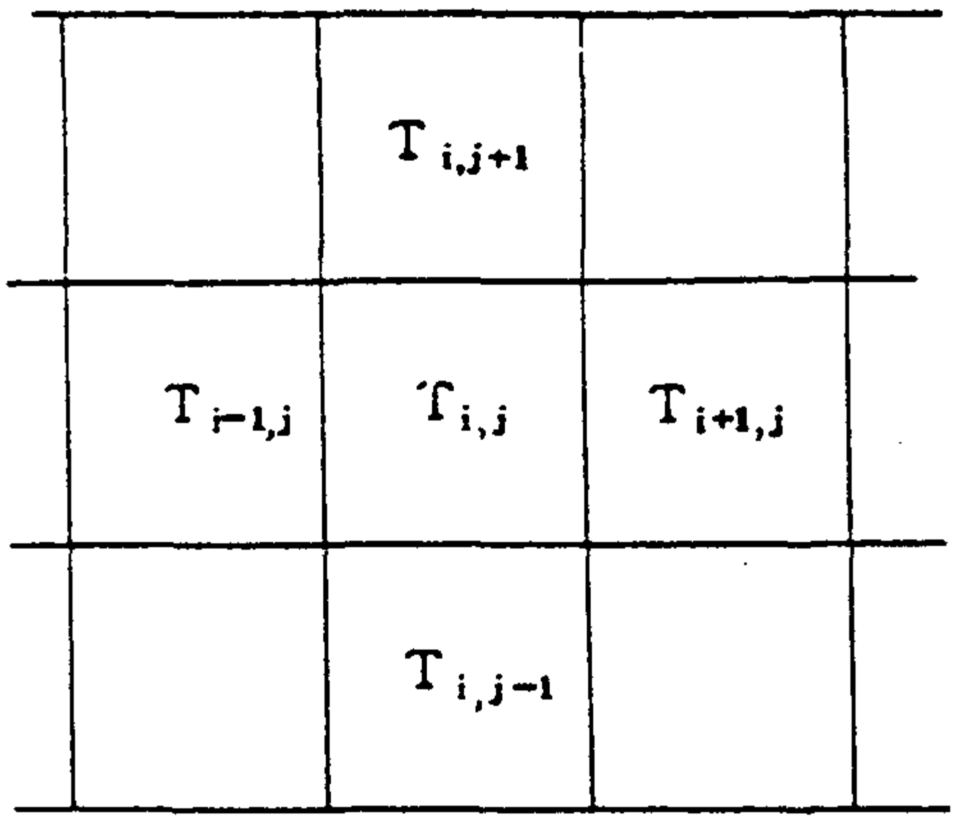


그림 7. 2차원 좌표계에서 절점의 분할

시간 ΔT 사이에 四角要素 (i, j) 內의 熱量變化量 Q_1과 인접한 面 Ae, Aw, An 및 As를 통하여 入, 出되는 熱量 Q_2는 각각 前述한 式 (5.a)(5.b)와 같으며 이를 다른 방법으로 표현하면 다음 式 (6.a)(6.b)와 같다.[3,4,5]

$$Q_1=\frac{\rho C}{\Delta t}\Delta V_{i,j}(T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j}) \quad \cdots\cdots (6.a)$$

$$Q_2=Q_w+Q_e+Q_s+Q_n \quad \cdots\cdots (6.b)$$

式 (6.b)에서 Qw, Qe, Qs, Qn을 Crank-Nicolson[5]방법으로 구하면 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned}
Q_w&=\frac{1}{Rw}\frac{1}{2}(T^{n+1}_{i-1,j}+T^{n}_{i-1,j}-T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})\\
Q_e&=\frac{1}{Re}\frac{1}{2}(T^{n+1}_{i+1,j}+T^{n}_{i+1,j}-T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})\\
Q_s&=\frac{1}{Rs}\frac{1}{2}(T^{n+1}_{i,j-1}+T^{n}_{i,j-1}-T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})\\
Q_n&=\frac{1}{Rn}\frac{1}{2}(T^{n+1}_{i,j+1}+T^{n}_{i,j+1}-T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})
\end{aligned}\right] \cdots\cdots (7)$$

한편 Rw, Re, Rs 및 Rn은 四角要素에 있어서 각 방향의 열저항이므로 Fig. 6에서 A_{i-1} 面, A_{i+1} 面, A_{j-1} 面 및 A_{j+1} 面의 각각의 傳熱係數를 $B_{i-1}, B_{i+1}, B_{j-1}$ 및 B_{j+1} 이라 두면 열저항R과 傳熱係數 B와의 관계는 다음과 같다.

$$\left.\begin{aligned}
Rw&=\frac{1}{A_{i-1}\cdot B_{i-1}}\\
Re&=\frac{1}{A_{i+1}\cdot B_{i+1}}\\
Rs&=\frac{1}{A_{j-1}\cdot B_{j-1}}\\
Rn&=\frac{1}{A_{j+1}\cdot B_{j+1}}
\end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots (8)$$

四角要素의 熱平衡을 고려하면 Fourier의 Energy 保存法則에 의해 $Q_1=Q_2$ 이므로 式 (6.a), (6.b)에 式 (7), (8)을 적용하여 정리하면 다음과 같은 差分式이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
&\frac{\rho C}{\Delta t}\Delta V_{i,j}\left(T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j}\right)\\
&=\frac{1}{2}A_{i-1}\cdot B_{i-1}(T^{n+1}_{i-1,j}+T^{n}_{i-1,j}-T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})\\
&+\frac{1}{2}A_{i+1}\cdot B_{i+1}(T^{n+1}_{i+1,j}+T^{n}_{i+1,j}-T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})\\
&+\frac{1}{2}A_{j-1}\cdot B_{j-1}(T^{n+1}_{i,j-1}+T^{n}_{i,j-1}-T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})\\
&+\frac{1}{2}A_{j+1}\cdot B_{j+1}(T^{n+1}_{i,j+1}+T^{n}_{i,j+1}-T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})
\end{aligned} \quad \cdots\cdots (9)$$

式 (9)에서 未知數는 $T^{n+1}_{i,j}$, $T^{n+1}_{i-1,j}$, $T^{n+1}_{i+1,j}$, $T^{n+1}_{i,j-1}$ 및 $T^{n+1}_{i,j+1}$ 5개이다. 이 경우는 Tridiagonal matrix 형태가 아니므로 쉽게 풀 수 없다. 따라서 $T_{i,j-1}$과 $T_{i,j+1}$이 주어진 i方向으로의 반복연산을 수행하여야 하며 이것을 도식적으로 표현하면 Fig. 7과 같다.

또한 式(9)를 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
2\frac{\rho C}{\Delta t}\Delta V_{i,j}(T^{n+1}_{i,j}-T^{n}_{i,j})=&A_{i-1}\cdot B_{i-1}T^{n+1}_{i-1,j}-(A_{i-1}\cdot\\
&B_{i-1}+A_{i+1}\cdot B_{i+1}+A_{j-1}\cdot\\
&B_{j-1}+A_{j+1}\cdot B_{j+1})\ T^{n+1}_{i,j}\\
&+A_{i+1}\cdot B_{i+1}\ T^{n+1}_{i+1,j}+A_{i-1}\\
&\cdot B_{i-1}\ T^{n}_{i-1,j}+A_{i+1}\cdot B_{j+1}\\
&T^{n}_{i+1,j}-(A_{i-1}\cdot B_{i-1}+A_{i+1}\\
&\cdot B_{i+1}+A_{j-1}\cdot B_{j-1}+A_{j+1}\cdot
\end{aligned}$$

$$B_{j+1})T^{n}_{i,j}+A_{j-1}\cdot B_{j-1}(T^{n+1}_{i,j+1}+T^{n}_{i,j-1})+A_{j+1}\cdot B_{j+1}(T^{n+1}_{i,j+1}+T^{n}_{i,j+1}) \cdots\cdots\cdots (10)$$

윗 式을 다시 정리하면

$$-A_{i-1}\cdot B_{i-1}T^{n+1}_{i-1,j}+(2\frac{\rho C}{\Delta t}\Delta V_{i,j}+A_{i-1}\cdot B_{i-1}+A_{i+1}\cdot B_{i+1}+A_{j-1}\cdot B_{j-1}+A_{j+1}\cdot B_{j+1})T^{n+1}_{i,j}-A_{i+1}\cdot B_{i+1}T^{n+1}_{i+1,j}=(2\frac{\rho C}{\Delta t}\Delta V_{i,j}-A_{i-1}\cdot B_{i-1}-A_{i+1}\cdot B_{i+1}-A_{j-1}\cdot B_{j-1}-A_{j+1}\cdot B_{j+1})T^{n}_{i,j}+A_{i-1}\cdot B_{i-1}T^{n}_{i-1,j}++A_{i+1}\cdot B_{i+1}T^{n}_{i+1,j}+A_{j-1}\cdot B_{j-1}(T^{n+1}_{i,j-1}+T^{n}_{i,j-1})+A_{j+1}\cdot B_{j+1}(T^{n+1}_{i,j+1}+T^{n}_{i,j+1}) \cdots\cdots\cdots (11)$$

이다.

式(11)를 Matrix 形態의 圖式으로 표시하면 아래와 같으며 이 행렬식은 Tridiagonal matrix로써 가우스 소거법으로 쉽게 풀 수 있다.[2]

$$\begin{bmatrix} B_2 & C_2 & & & & \\ A_3 & B_3 & C_2 & & & \\ & A_4 & B_4 & C_4 & & \\ & & \vdots & & & \\ & & A_i & B_i & C_i & \\ & & & \vdots & & \\ & & & & A_{n-1} & B_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ \vdots \\ T_i \\ \vdots \\ T_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ \vdots \\ D_i \\ \vdots \\ D_{n-1} \end{bmatrix} \cdots (12)$$

式 (11)을 Iteration에 의해 解를 求하는 과정을 Flow chart로 나타내면 다음과 같다.

3. 3 수치해석 결과의 고찰

그림 11은 히터 Withdrawal rate가 응고선단 성장속도에 미치는 영향을 실험에서 측정한 결과를 나타내고 있다. 여기서 히터의 상승속도와 응고선단 진행속도가 일치하도록 하기 위하여는 히터 상승속도를 4.5~6.0㎜/min로 유지하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

그림 12는 히터 상승높이에 따른 응고선단 진행속도를 측정한 결과를 나타낸다.

전기히터 상승속도를 5㎜/min으로 하였을때 수치해석에 의한 응고양상은 그림 13과 같다. 히터 상승시 용기내부를 강제냉각 하지 않았을 경우는 외면에 비해 열방출이 현저히 느려 응고선단이 용기내면으로 치우쳐진 양상으로 나타났으며 내부만 35N㎥/min의 압축공기로 강냉할 경우 응고선단은 외벽으로 치우치는 양상으로 나타났다.

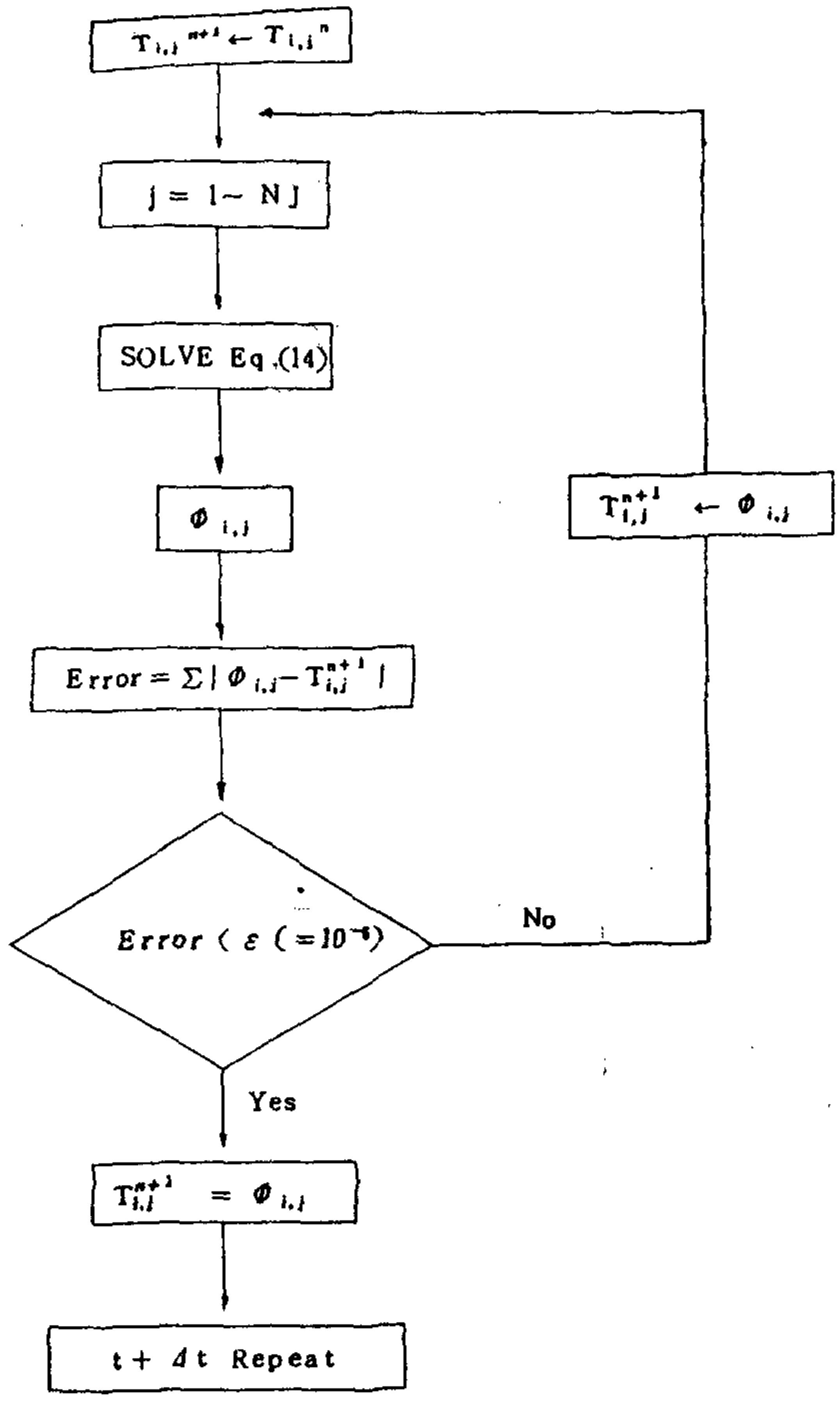


그림 8. 반복연산에 의한 컴퓨터 해석을 위한 플로우차트

Fig. 14는 수송용기 외부를 자연냉각 시키고 내부는 35N㎥/min의 압축공기를 취입하면서 히터 상승속도를 변화시켰을때의 응고양상을 나타낸다. 히터 상승속도가 3.3㎜/min일 경우는 외면에 비해 내면의 응고가 신속하여 외면으로 치우치게 되며 히터 상승속도가 6.6㎜/min일 경우는 내, 외부 응고가 균일하게 진행되었고 10㎜/min의 상승속도에 대하여는 응고선단이 내벽으로 치우치게 되었다.

즉, 내·외부 응고진행이 균일한 속도를 얻기 위해서는 용기내부에 35N㎥/min의 공기를 취입하고 히터 Withdrawal 속도를 5.0~6.6㎜/min로 유지할 때까지 가장 적합한 것으로 판단된다.

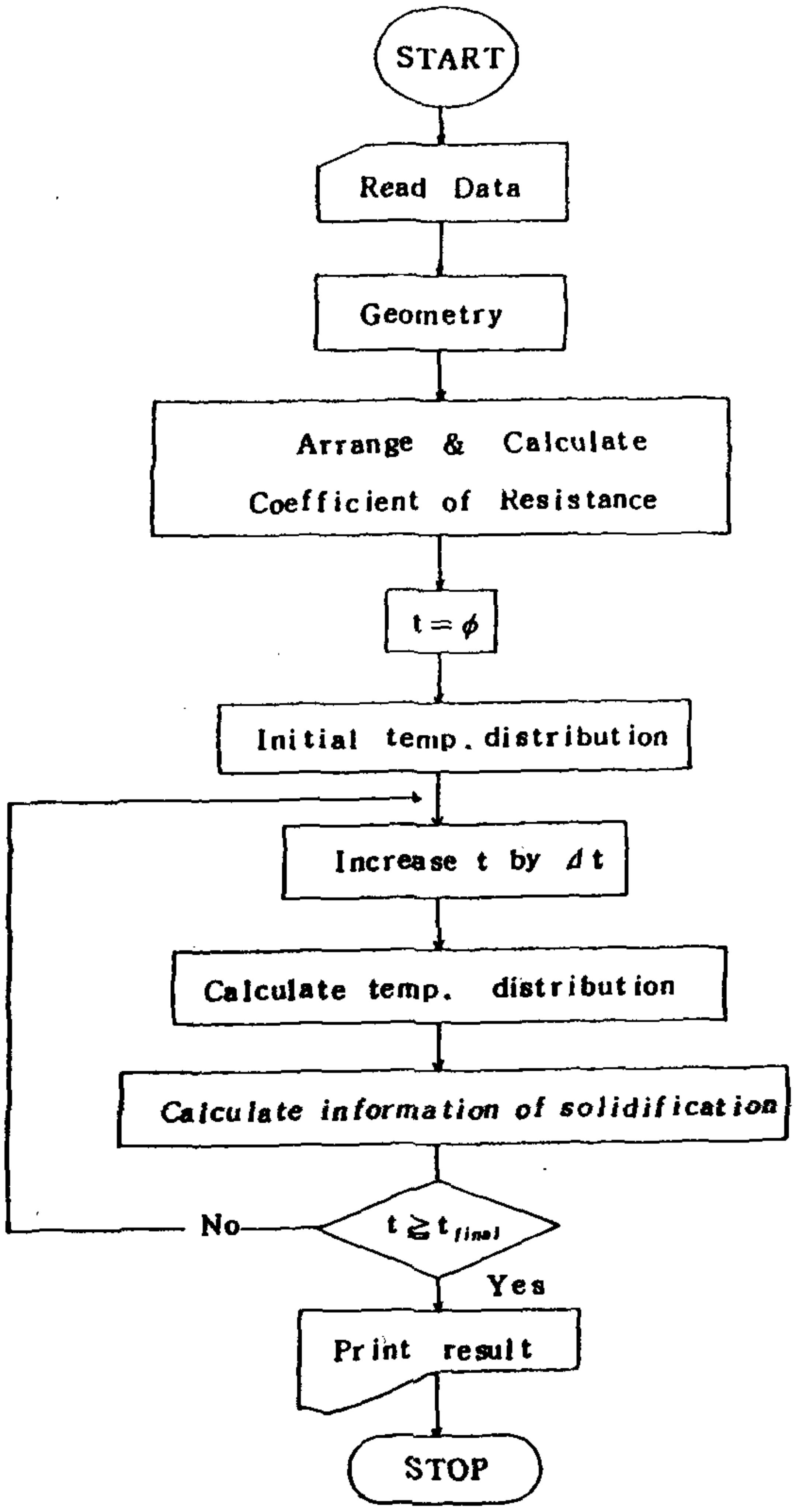
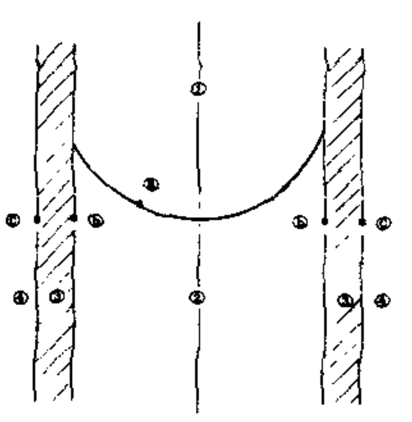


그림 9. 주물내 응고과정 온도분포 해석을 위한 컴퓨터 프로그램의 플로우차트



①	Molten lead
②	Solidified lead
③	Stainless steel plate
④	Atmosphere

ID	Description	Boundry conduction
ⓐ	Interface of liquid-solid	Heat conduction
ⓑ	Interface of liquid-steel mould	Heat conduction
ⓒ	Interface of steel mould-atmosphere	Heat convection

그림 10. 반 무한 판상 주물의 온도분포 해석을 위한 경계조건 구분

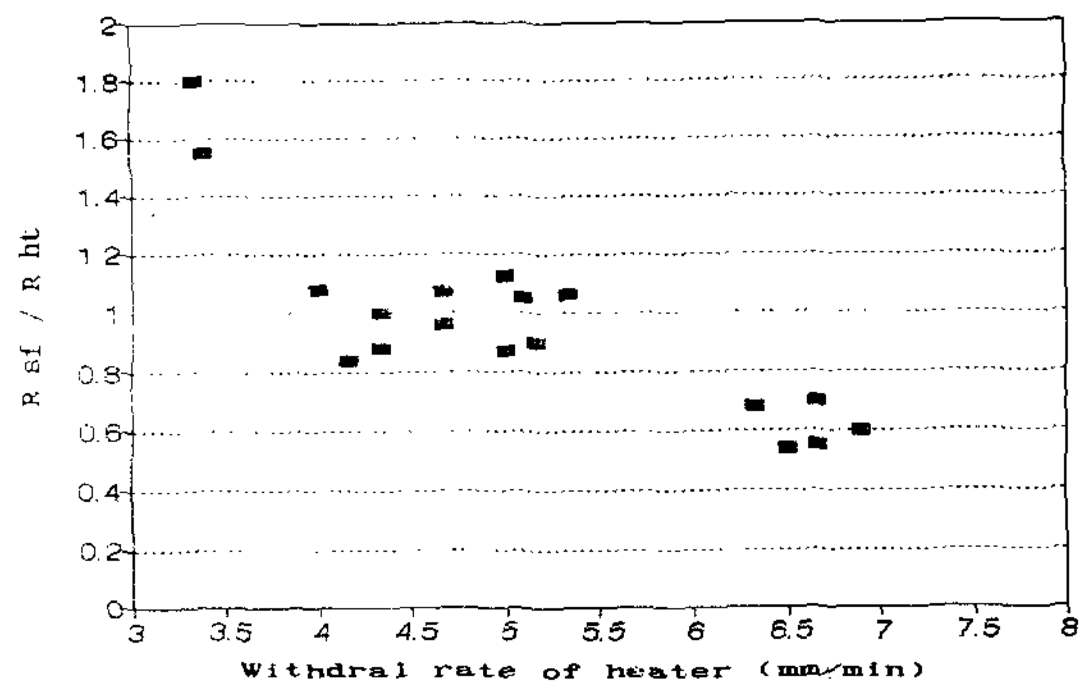


그림 11. 히터 상승속도가 응고속도비에 미치는 영향

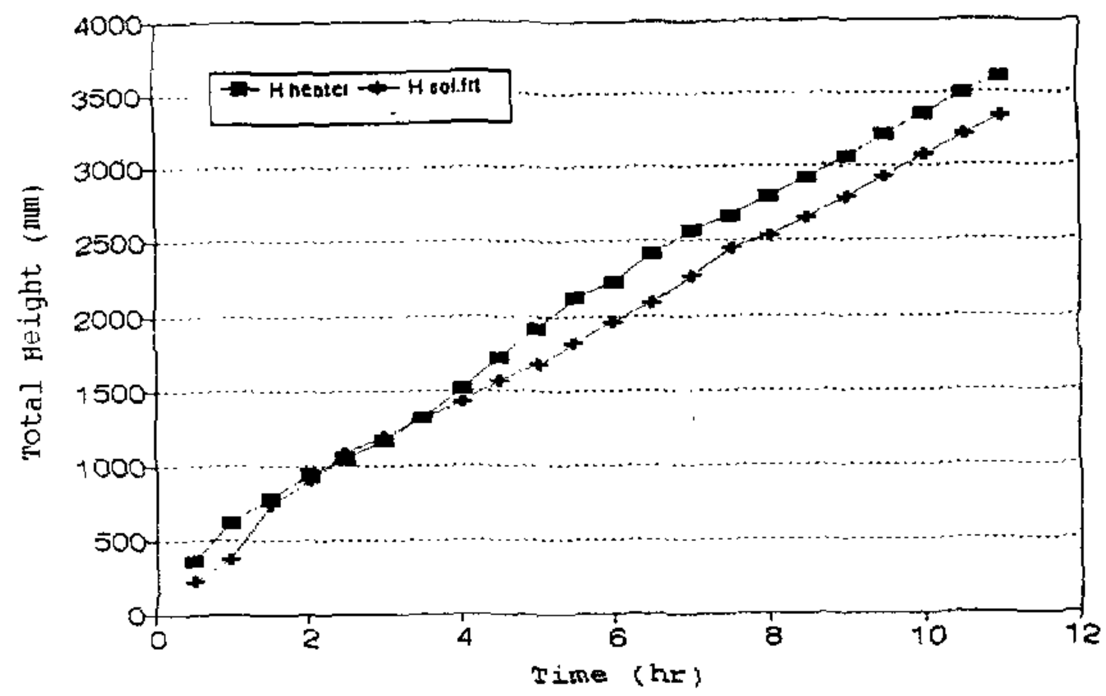
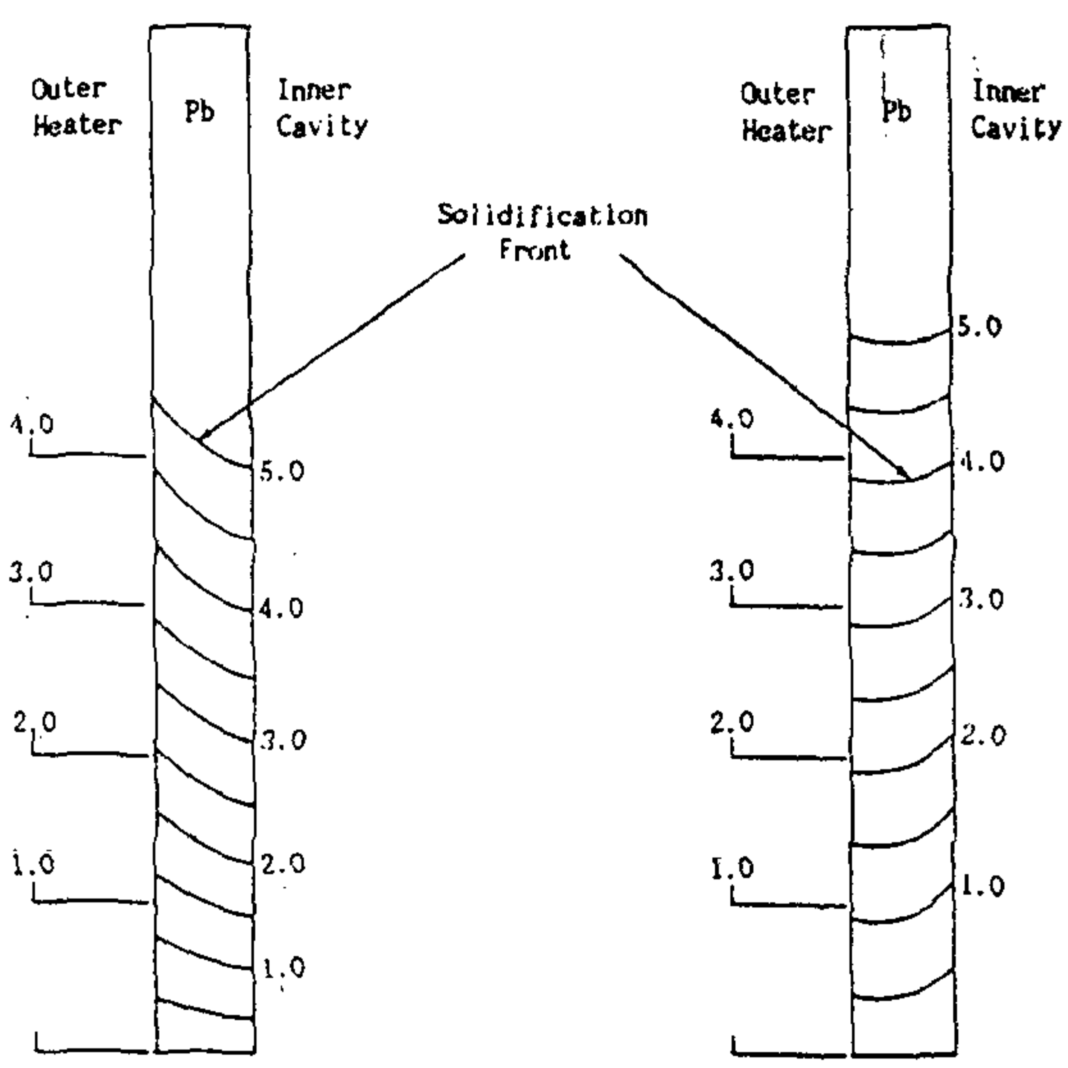


그림 12. 주입종료후 시간 경과에 따른 히터상승 높이와 응고높이의 변화



ⓐ내면을 자연 냉각시 ⓑ내면을 강제 냉각시

그림 13. 히터상승속도를 5mm/min으로 적용할때의 응고 양상

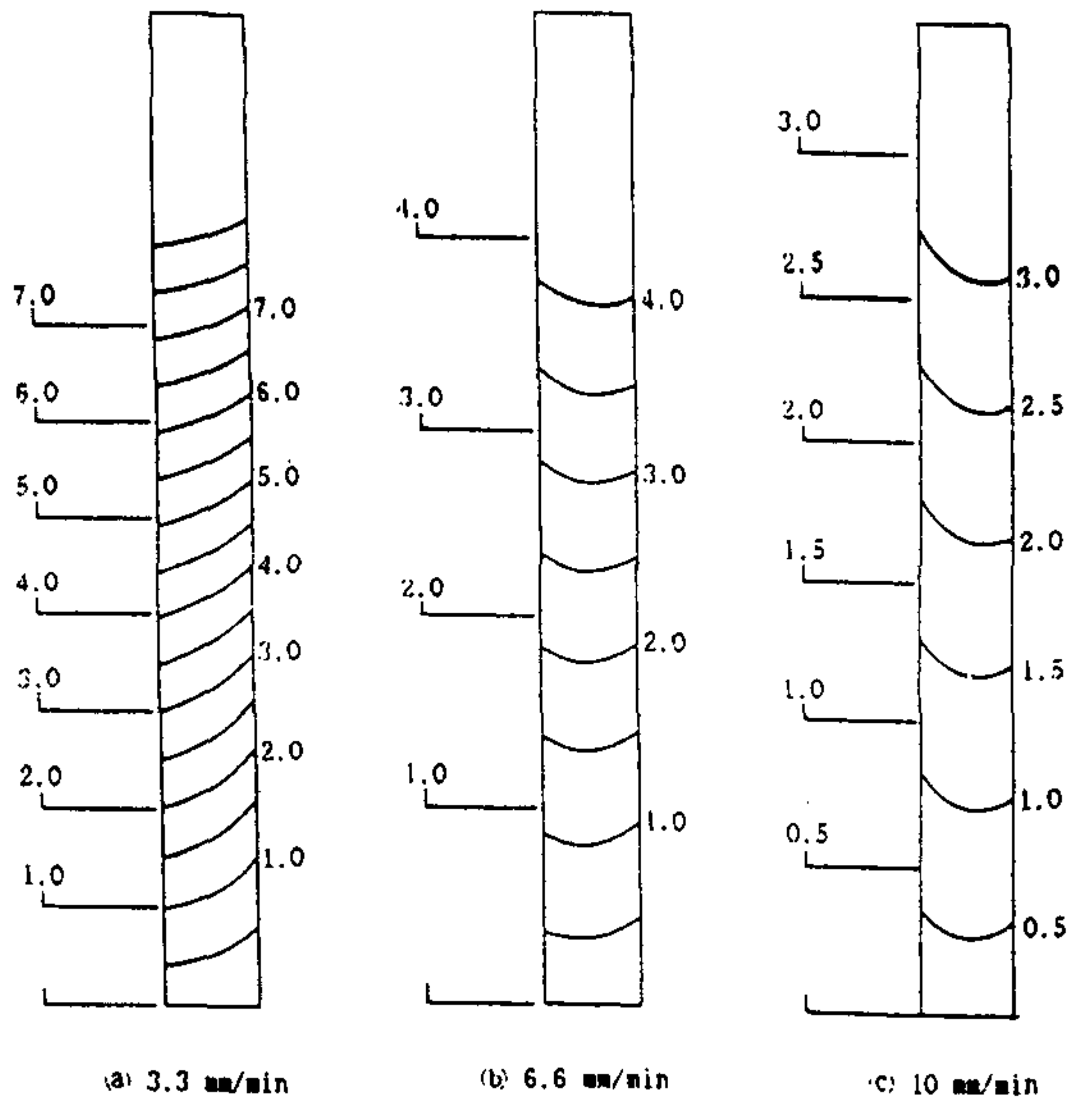


그림 14. 내면을 강냉하면서 히터 상승속도를 변화시킬 경우의 응고양상 변화

이 결과를 실제 수송용기의 납 주조에 적용하여 히터 상승속도를 5.0㎜/min, 공기 취입량 35N㎥/min를 적용하여 일방향 제어응고를 한 결과 응고선단 이동속도의 측정치와 잘 일치하였다. 또한 주조 후 γ-Ray Scanning 시험에 의한 건전성 측정에도 우수한 품질을 얻을 수 있었음이 확인되었다.

4. 결론

1) 히터 상승속도를 5.0~6.6㎜/min로 하고 용기내부에 35N㎥/min의 공기를 취입한 결과 히터 상승속도와 응고 진행속도가 일치하며, 이 결과는 수치해석결과와 응고선단이동속도를 측정한 결과와 잘 일치하였다.
2) 용기의 내면과 외면의 균일한 응고진행을 얻기 위하여는 내부에 공기취입에 의한 강냉이 필요하며 히터 상승속도 5.0~6.6㎜/min에 대하여 강냉이 필요한 적정 공기량은 35N㎥/min으로 판단된다.
3) 상기조건으로 일방향 제어응고된 주조품에 대해 γ-Ray Scanning 시험을 한 결과 주조 건전성이 입증되었다.

참 고 문 헌

1) J.P.Holman, Heat Transfer (4th ed.)Mc Graw－Hill, New York, 1972.
2) E.R.G.Eckert and R.M.Drake Jr.,Analysis of Heat and Mass Transfer,Mc Graw－Hill, 1972.
3) 大中逸雄, "Computer 傳熱凝固解析入門", 丸善株式會社 東京, p. 20~205, 1985.
4) 梅田高照, "鑄造品 凝固解析의 基礎", 日本 鑄物 CENTER SYMPOSIUM, 5, P. 1~20, 1984.
5) 大中逸雄, "Computer よる 各種 凝固解析法の 原理と 特徵", 日本 鑄物 CENTER SYMPOSIUM, 5, P. 21~33, 1984.
6) Brice Carnahan, H.A.Luther, James O. Wilkes, "Applied Numerical Methods", John Willey & Sons, INC., New York, p. 449~457, 1969.