

技術資料

實用化되는 鑄物の 流動解析

柳 成 坤

Flow Analysis of Cast Iron

S. K. Yu

1. 서 론

鑄型內의 溶湯의 流動現象을 解析하는 技術이 實用化되기 시작하고 있다. 기존 開發된 凝固解析에 流動解析이 가미됨에 따라 品質向上, 設計時間의 短縮, 生産費의 低減등이 期待된다. 流動解析의 目的은

- (1) 湯流에 起因하는 欠陷(湯境, gas 混入)의 위치 予測
- (2) 凝固解析의 初期溫度分布予測의 2種類이다.

解析의 對象이 되는 鑄物の 種類는 薄肉鑄物과 厚肉鑄物, 鑄造方法은 Die Casting, 重力鑄造, 低壓鑄造등으로 나뉜다. 현재, 日本에서 販賣되고 있는 流動解析 software의 종류와 특징은 표1과 같다.

2. 凝固解析과 流動解析의 關係

鑄物の 流動解析과 凝固解析은 嚴密히 보면 相

互影響을 미치는 關係에 있다. 流動解析으로 부터 구한 鑄型과 溶湯의 溫度分布는 凝固解析의 初期條件이 되며 또한 凝固解析으로 부터 알 수 있는 溶湯의 粘性變化(固相率變化)는 流動現象에 影響을 준다.

收縮缺陷의 予測에 利用 되어온 凝固解析에서는 注湯中에 鑄型과 溶湯의 溫度變化는 고려하지 않고 溶湯이 完全히 充滿되면 凝固가 開始한다고 假定하여 왔다. 그러나 實際 鑄造에 있어서는 注湯중에 溶湯과 鑄型의 溫度는 變化하며 連續鑄造의 경우 鑄型에 溫度分布가 생기게 된다. 여기에 서 重要한 것은 充滿完了때 까지의 時間과 凝固完了 때까지의 時間의 比이다. Die Casting의 경우, 대단히 빠른속도로 鑄型內에 溶湯이 充滿된다. 이 경우 鑄型과 溶湯사이의 傳熱量은 적고 溶湯의 粘性變化도 적다. 따라서 流動解析과 凝固解析을 분리시켜 생각할 수 있다. 그러나 重力鑄造나 低壓鑄造의 경우처럼 比較的 천천히 溶湯이 充滿되는 鑄造法에서는 粘性이나 溫度의 變化를 無視할 수 없다. 또한 Die Casting의 경우에 있어서는 薄肉

표 1. 重要 流動解析 Software

SOFTWARE 名稱	開發元	解析對象	要素分割	粘性變化
SOLDIA-FLOW	KOMATSU	重力鑄造	直交格子	考慮
CASTA4	TOYOTA 自動車	DIE CASTING	任意形狀	"
CASTAX	TOYOTA 自動車	低壓鑄造	直交格子	"
METAL FILL	日本 UNISYS	DIE CASTING	3 角形	"
SCYCLE	日立金屬	低壓鑄造	任意形狀	無視
HICASS /FLOW	日立製作所	DIE CASTING	直交格子	"
FLOW-3D	美國 FLOW SCIENCE 社	汎用	直交格子	考慮

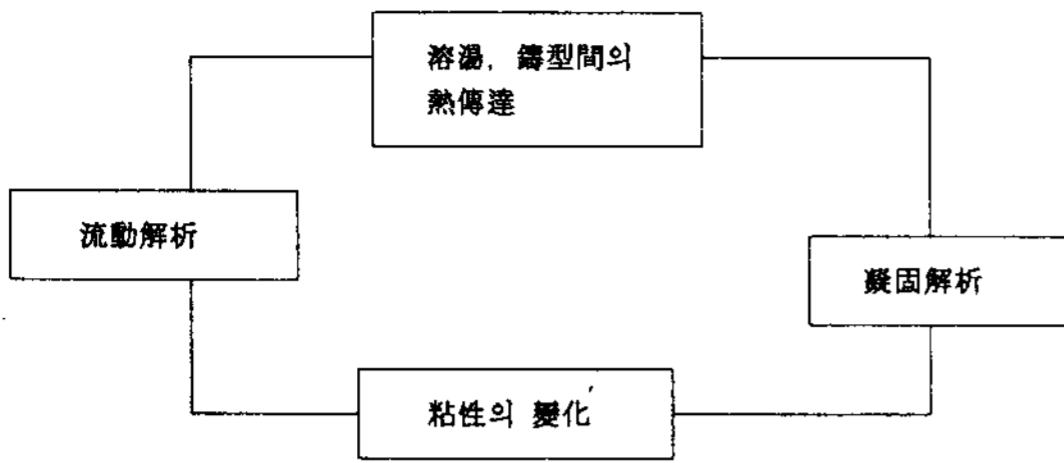


그림 1. 凝固解析과 流動解析과의 關係

이나 複雜形狀 鑄物의 경우 鑄型이 溶湯에 미치는 영향이 크기 때문에 粘性이나 溫度의 變化를 고려하지 않으면 안된다.

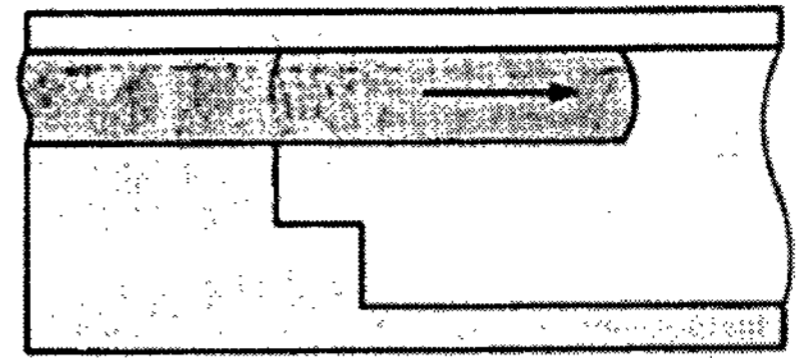
3. 樹脂의 流動解析

現在, 市販되고 있는 樹脂의 流動解析 software는 粘性力支配 流動으로 解析하고 있다. Plastic 같은 樹脂의 射出成形에 있어서 慣性力과 粘性力의 比인 Reynold's 수는 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 정도로 작아 粘性力에 비해 慣性力의 영향을 무시할 수 있다. 熔融金屬의 粘性은, 樹脂보다도 낮기 때문에 樹脂의 流動과 同一하게 생각할 수 없다. 그러나 鑄物의 種類에 따라 樹脂의 流動解析을 改良하여 적용시킬수 있다.

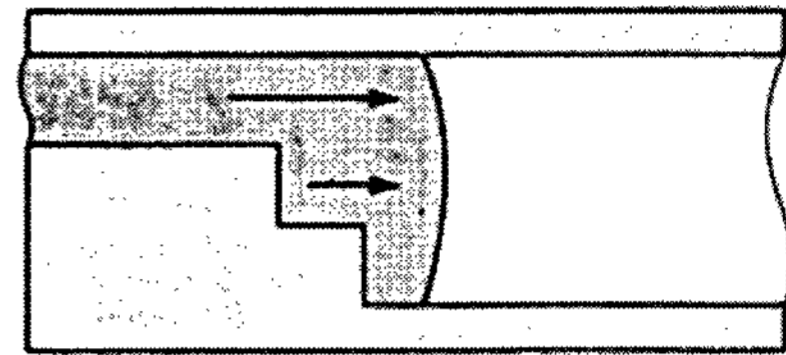
粘性力支配로서 流動解析하고 있는 software로는 厚肉의 低壓鑄造를 대상으로하는 Toyota의 Castax, 日立金屬의 Scycle 그리고 複雜形狀의 薄肉鑄物을 對象으로 하는 Toyota의 CASTA4가 있다.

粘性力支配의 樹脂流動의 解析方法에는 FAN (Flow Analysis Network) 法이라는 즉 壓力구배에 의해 流量을 決定하는 方法이 있다. CASTA4는 FAN법을 기초로 改良하여 凝固鑄型內의 壓力, 重力등을 고려하여 任意形狀에 적용할수 있도록 하였다. Scycle도 Fan 法을 改良하고 있다. CASTA4는 Die Casting 鑄物을 解析할수도 있다. Die Casting은 流速이 빠르고, 溶湯의 粘性도 낮기때문에 慣性力이 크다.

그러나, 薄肉이며 複雜形狀의 경우 溶湯은 鑄型의 內壁에 충돌하여 慣性力이 저하되므로 粘性力支配의 流動으로서도 慣用上 문제가 되지 않는다고 간주하고 있다.



慣性力支配



粘性力支配

그림 2. 慣性力支配 流動과 粘性力支配 流動의 차이 慣性力支配 粘性力支配

4. Die Casting과 重力鑄造의 流動解析

慣性力支配의 流動은 粘性力支配의 流動과는 현저하게 다르다. 低壓鑄造에서는 거의 문제가 되지않지만 重力鑄造와 Die Casting의 경우 慣性力의 영향이 크다. 流速方向으로 空間이 확장되어가는 形狀의 경우(그림 2) 특히 慣性力의 영향이 나타나기 쉽다.

慣性力支配의 流動으로서 解析하고 있는 software로는 Komatsu의 Soldia/Flow, 日本 Unisys의 Metal Fill, 日立製作所의 Hicass/Flow가 있다. 慣性力支配의 流動에서는 溶湯의 先端인 自由表面이 어떻게 移動하는가를 計算으로 구하지 않으면 안된다. 各 software 공히 自由表面의 計算에는 Marker法을 사용하고 있다. Soldia-Flow는 重力鑄造를 對象으로 하고 있다. 重力鑄造의 경우 一般的으로 큰 鑄型속에 溶湯이 힘차게 流入되기 때문에 鑄型內에서 溶湯이 回轉한다. 따라서 해석에는 慣性力의 考慮가 필요하다. 더우기, Die Casting의 경우처럼 短時間에 溶湯의 注入이 完了하지 않기 때문에 凝固도 동시에 進行한다. 따라서 粘性의 變化도 고려하지 않으면 안된다.

5. Water Model 代用的 流動解析

Die Casting의 溶湯流動現象을 아는 方法으로

서 water model 實驗法을 종종 사용하고 있다.鑄型和 똑같은 형태를 가진 透明한 容器內에 물을 흘려 사진등을 이용해 流動現象을 확인하는 방법이다.

熔融 Al의 動粘性係數는 물과 거의 같기 때문에 유효한 방법이다. 그러나 3次元적으로 複雜形狀이 되면 製作에 時間과 費用이 들게 된다.日立製作所는 이 water model 實驗代用으로서 Hicass/Flow를 開發했다.鑄型으로의 熱傳達, 溶湯의 凝固는 전혀 고려하지 않고 3次元 慣性力支配의 流動으로서 解析하고 있다.

6. 凝固解析을 위한 流動解析

凝固解析에 있어서 鑄型和 溶湯의 初期溫度分布를 구하기 위해 流動解析을 하는 경우도 적지 않다.

Die Casting의 경우 湯流에 起因하는 欠陷이 重要하지만 重力鑄造나 低壓鑄造에서는 凝固解析을 위한 流動解析의 意味가 강하다.

日立金屬의 Scycle은 低壓鑄造를 連續적으로 행함에 의해 鑄型內에 어떤 온도분포가 생기는가를 解析할 수 있다. Komatsu의 Soldia-Flow, Toyota의 Castax도 注入過程에 있어서 溶湯의 凝固와 鑄型의 溫度分布를 구할 수 있다.

7. 粘性係數의 溫度變化

鑄型內에 溶湯이 充滿됨에 따라 鑄型과의 熱傳達에 의해 溶湯에 溫度는 低下해 간다. 溫度가 低下할수록 金屬의 粘性은 증가한다. 固相率이 1에 가까와짐에 따라 動粘性係數는 急激히 증가하게 된다.

動粘性係數가 증가할수록 粘性力의 영향은 커지고 流動狀態에 변화를 미치게 된다. 이 粘性의 變化를 流動解析에 加味시키고 있는 software가 Komatsu의 Soldia-Flow, Toyota의 CASTA4, Castax, 日本 Unisys의 Metal Fill이다. 粘性支配의 流動인 射出成形의 流動解析에서는 粘性의 영향이 매우 중요하기 때문에 溫도와 壓力에 의해 樹支의 粘性이 어떻게 변화하는가에 관한 연구가 활발히 진행되고 있고 꽤 신뢰할만한 關係式이 提示되고 있다. 그러나 熔融金屬에 있어서 溫도와 粘性의 關係는 아직 確立되어 있지 않다. Toyota는 回轉法에 의해 實驗적으로 粘性을 測定하여 다

음식을 이용하고 있다.

$$\mu = \frac{\mu_0}{(1-F)^n}$$

즉, 溫도의 關數인 固相率 F로부터 粘性係數 μ 구하고 있다. 여기에서 μ_0 는 固相率이 0일때의 粘性係數, n은 金屬에 따라 결정되는 粘性補正係數이다. 日本 Unisys도 Toyota와 같은 식을 사용하고 있지만 粘性補正係數의 값이 다르다. 日本 Unisys의 경우 回轉法에 의한 測定대신 實際鑄造時의 缺陷位置와 流動解析의 結果가 일치하도록 粘性補正係數의 값을 정하고 있다. Komatsu도 溶湯의 粘性變化의 重要性을 인식하고 있다. 현재 回轉法에 의한 實驗値와 文獻에 의한 값을 토대로 溫도의 關數로서 근사시키고 있으며 어떤 식을 사용하는가에 대해 고려중에 있다. 다만 固相率이 1에 가까와짐에 따라 粘性이 급격히 증가하여 계산이 곤란하게 되므로 어떤 固相率이상이면 溶湯이 정지한다고 가정하고 있다.

8. 任意形狀이 可能な 要素分割方法

Komatsu의 Soldia-Flow, Toyota의 Castax, 日立製作所の Hicass/Flow는 直交格子로서 要素分割을 행하고 있다. 이 分割方法은 要素分割이 容易하며 計算時間이 단축되는 利點이 있다. 또 凝固解析과의 關係에도 영향을 주고 있다. 현재 실용화되어 있는 凝固解析은 直交格子가 주류를 이루고 있다.

Soldia-Flow는 流動解析만 행할 수도 있다. 그러나 원래 Komatsu는 凝固解析 software인 Soldia의 option으로서 Soldia-Flow를 開發했다. 따라서 同一數値 model로써 解析이 可能하도록 直交格子를 이용하고 있다. 日立製作所の Hicass/Flow도 同社의 凝固解析 software인 Hicass와 model을 共有할 수 있고 解析結果가 상호영향을 미치도록 하는것도 容易하다. 그러나, 直交格子는 복잡형상의 표현이 곤란하다. 특히 薄肉鑄物의 경우, 座標軸에 대해 角度를 지니는 부분은 꽤 미세한 直交格子로 分割하지 않으면 精度 좋은 分割을 할 수 없다.(그림 3)

더우기, 直交格子分割에서는 鑄物의 表面積이 커지게 되어 傳熱特性에도 영향을 미치게 된다.

그래서, 日本 Unisys의 Metal Fill, Toyota의 CASTA4, 日立金屬의 Scycle은 三角形 또는 4邊

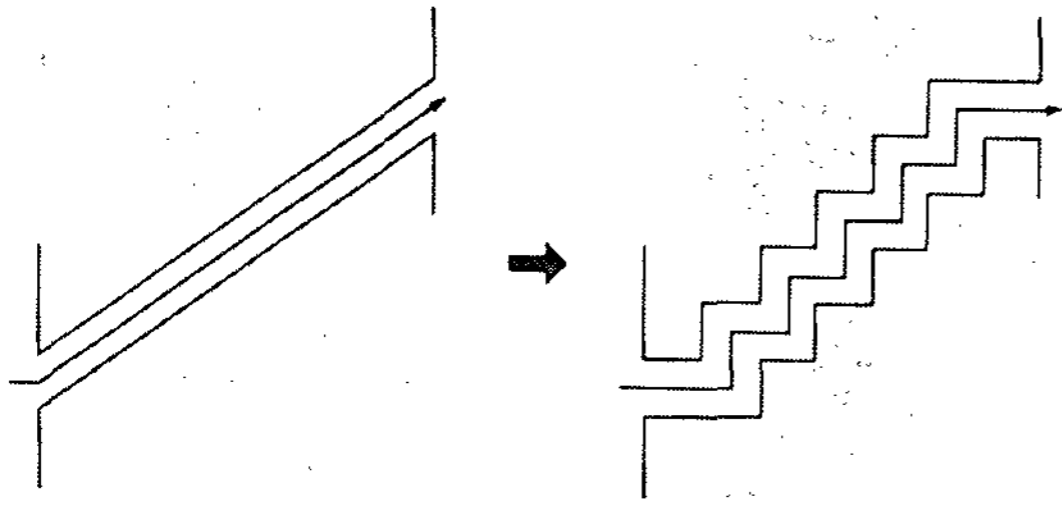


그림 3. 座標軸에 대해 경사를 이루는 薄肉部分을 直交格子로 分割하면 實際의 流動과 다른 結果가 나타날 수 있다.

形要素로써 分割하고 있다. 여기에서 주의할점은 各 software 모두 有限要素法을 사용하는 것이 아니고 非直交格子로서 差分法을 사용하고 있는 점이다. CASTA4, Scycle은 直接差分法을 사용하고 있다. 이 방법은 微分方程式을 경유하지 않고 直接 各 要素間의 物理現狀을 差分化 시키고 있다. 計算은 複雜하지만 各 要素를 크게 만들기 때문에 計算時間의 合計는 短縮된다. Metal Fill software에서는 差分法의 微係數대신에 形狀關數를 導入하여 有限要素法的으로 平價하고 있다. 日本 Unisys에서는 同方法을 FEMAC(Finite Element Marker and Cell)法이라고 부른다. 새로운 수법의 개발로 非直交格子로 差分法의 사용이 가능하게 되었다. 다만, 現狀에서 적용가능한 對象은 限定되어 있고 完全히 確立된 方法은 아니다.

9. 解析 model의 作成方法

各 解析의 software는 pre-processor로써 解析 model을 作成하고 있다. 現 段階에서 製品設計의 3次元 CAD data를 받아 解析 model의 作成에 利用하는 것은 容易하지 않다. Toyota의 CASTA4, 日本 Unisys의 Metal Fill, 日立製作所의 Hicass/Flow는 鑄型의 溫度變化를 考慮하지 않기 때문에 製品의 形狀 data 만으로 充分하다. CASTA4에서는 製品設計와 解析 model을 共有하고 있다. 그러나, 鑄型의 溫度變化를 考慮할 경우 鑄型의 model도 作成하지 않으면 안된다. 日立金屬의 Scycle의 pre-processor도 CAD의 平面圖를 읽어 들여 解析 model을 作成한다.(그림 4)

우선, 읽어 들인 平面圖를 要素分割하여 높이 방향으로 쌓아 올려 3次元化를 행한다. 다음 어느 부분이 鑄型인가 등의 領域을 指定하고 物性值 data를 入力하여 解析을 행한다. 日本 Unisys의 Metal Fill, Toyota의 CASTA4는 任意形狀의 要素를 사용하고 있기 때문에 構造解析등의 有限要素法 software와 解析 model을 共有할 수 있다.

10. 解析結果

凝固解析에 있어서는 等固相率線, 溫度勾配로부터 收縮缺陷의 발생위치를 예측할 수 있는 방법

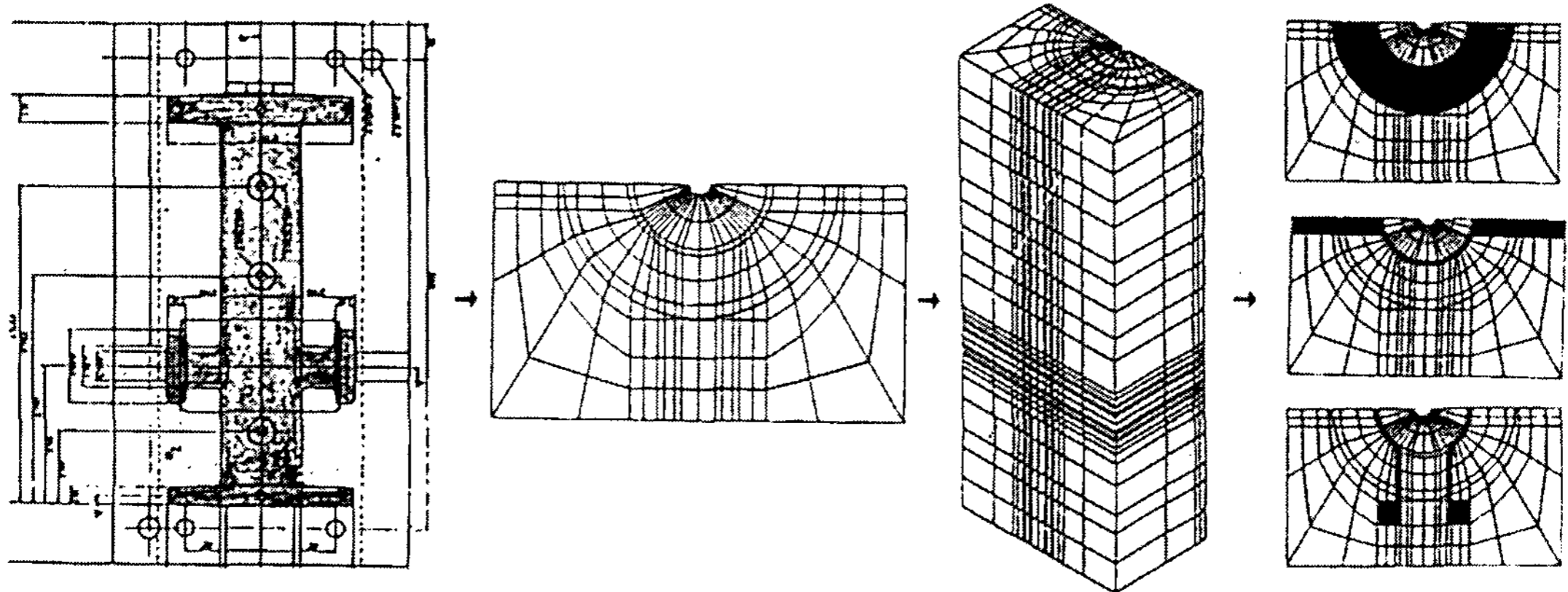


그림 4. Scycle의 pre-processor SPRE는 CAD로부터 平面圖를 읽어 要素分割, 3次元化, 境界條件을 指定한다.

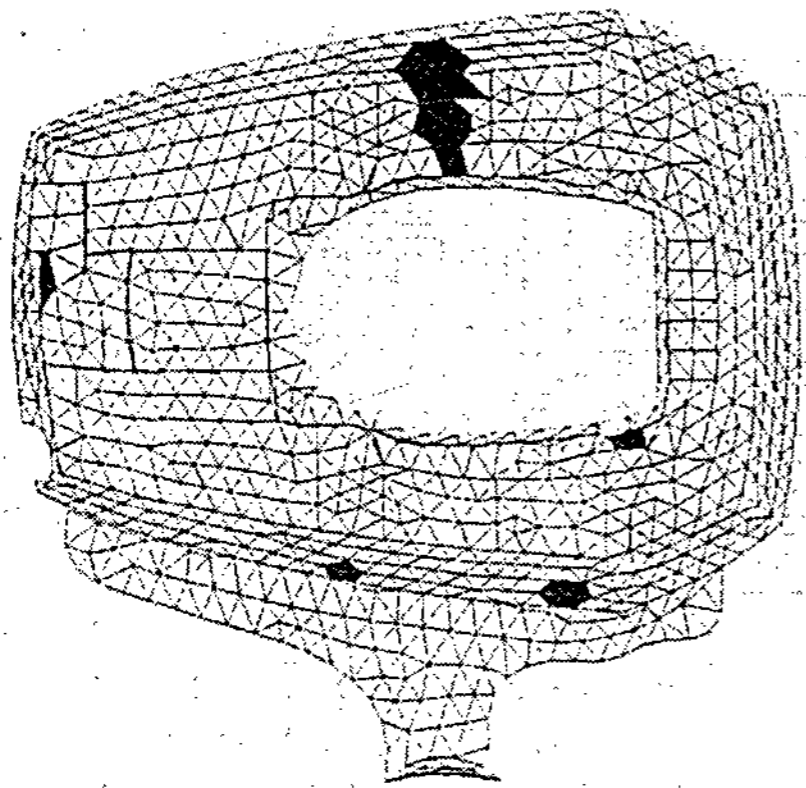


그림 5. 日本 Unisys의 Metal Fill software의
湯流에 의한 缺陷豫測圖

이 어느 정도 확립되어 있다. 그러나, 流動解析의 경우 解析結果로부터 결함을 예측하는 방법은 아직 施行錯誤의 단계에 놓여 있다. Metal Fill과 CASTA4의 경우 湯流에 의한 결함예측항도 포함되어 있다.

Metal Fill의 경우, 그림 5와 같이 缺陷位置豫測圖가 나타난다.

各 要素를 통과하는 溶湯의 流速方向에 착안하여 어느 각도 이상으로 溶湯이 교차하면 그위치에 氣胞가 발생한다고 가정하여 空氣 marker를 출현시킨다. 이 空氣 marker는 溶湯과 함께 移動하며 최종적으로 어느 위치에 남게 되는가를 알 수 있다.

空氣 marker가 溶湯의 先端부에 올 경우 이것을 제거시키는 대책도 마련되어 있다. 다만, 현단계에서 실제 결함의 발생보다도 더 많은 缺陷豫測이 나타나기 때문에 空氣 marker의 發生, 消去의 알고리즘을 개량할 계획이다. CASTA4는 각 요소

에 있어서 溶湯의 合流狀態를 4종류로 분류하고 그 結果로부터 缺陷豫測圖를 作成하고 있다.

11. 끝맺음

環境問題가 제기되고 自動車의 燃費低減, 輕量化의 요구가 강하게 대두되고 있는 실정이다. 대량생산에 적합한 鑄造品은 自動車部品에도 많이 사용되고 있다. 當然, 鑄造品도 輕量化가 요구되고 薄肉, 複雜形狀의 鑄造品 需要도 급증하고 있다. 이러한 추세에 부응하기 위해서는 凝固解析에 流動解析을 가미하여 鑄造解析의 信賴性, 適用範圍를 넓혀가야 할 것이다. 今後, 解析技術의 發達과 함께 解析結果를 어떻게 判斷하고 또한 判斷에 따라 어떻게 對策을 세우며, 實際의 設計에 解析 system을 어떻게 導入시킬 것인가에 관해 숙고할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 中山 力
Nikkei Mechanical, Vol.12, 1991
2. Masao Kikuchi: "Current Situation of R & D for Solidification Simulation Technology" Trans. Japan Foundrymen's Society Vol.9(1990)
3. 大中逸雄: "Computer Simulation 技術" Nikkei Mechanical Vol.5, 1991
4. 大中逸雄: "凝固現像의 Computer Simulation" 日本金屬學會會報 Vol.30, 1991
5. 大中逸雄: "鑄造次陷의 Computer Simulation" 鑄物 Vol.61, 1989