

주조금형 설계에서의 열응력 해석

Thermal Stress Analysis for Mold Design in Cast Analysis

곽시영, 최명규, 김정인, 최정길



Casting Simulatin & Mold Design

주조 공정 해석

유동해석 →

응고해석 →

응력해석 →

금형 해석

유동 해석에 의한 금형의 초기 온도 분포

+

제품과 금형의 열전달에 의한 온도 변화

+

상기 열전달에 의한 열응력 해석

고상/액상을 고려한 열응력 해석

제품과 금형의 구속을 고려한 응력 해석

+

열응력 해석을 이용한 금형의

피로/미세결함 예측

=

금형의 최적 설계

Schematic of FDM/FEM analysis

Hybrid Method = FDM (heat transfer) + FEM (Stress)

FDM
(Finite Difference Method)

- Simple and Fast
- Fine mesh & Easy to mesh
- Advantage in Temperature & Fluid Analysis

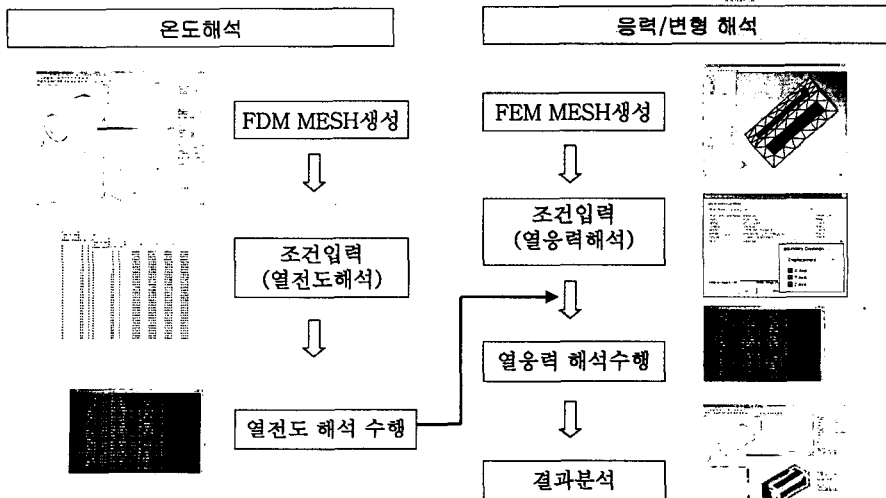
+

FEM
(Finite Element Method)

- Exact Represent
- Advantage in Stress Analysis

3

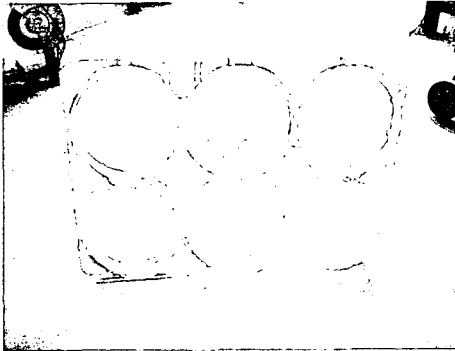
Computational Procedure



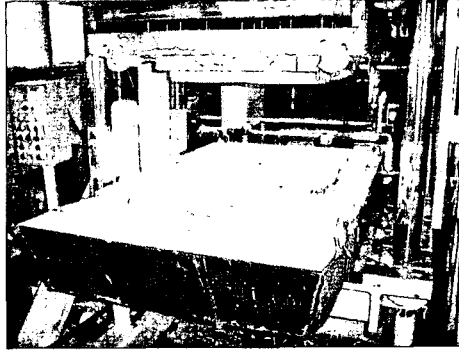
4

제품과 금형의 열응력 해석

Bulk head Analysis



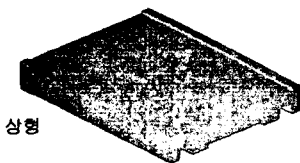
제품



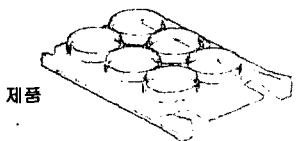
금형

5

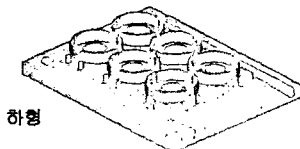
제품과 금형의 열응력 해석 - Modeling/ Mesh



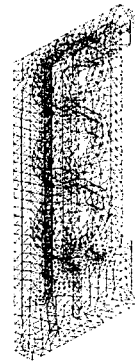
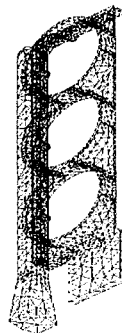
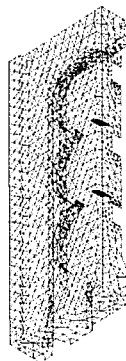
상형



제품



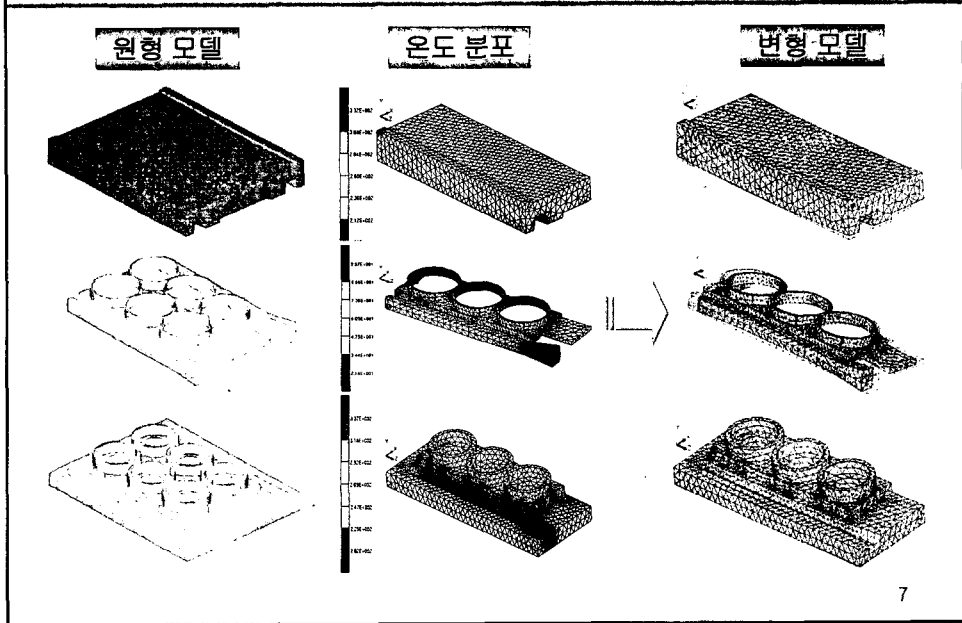
하형



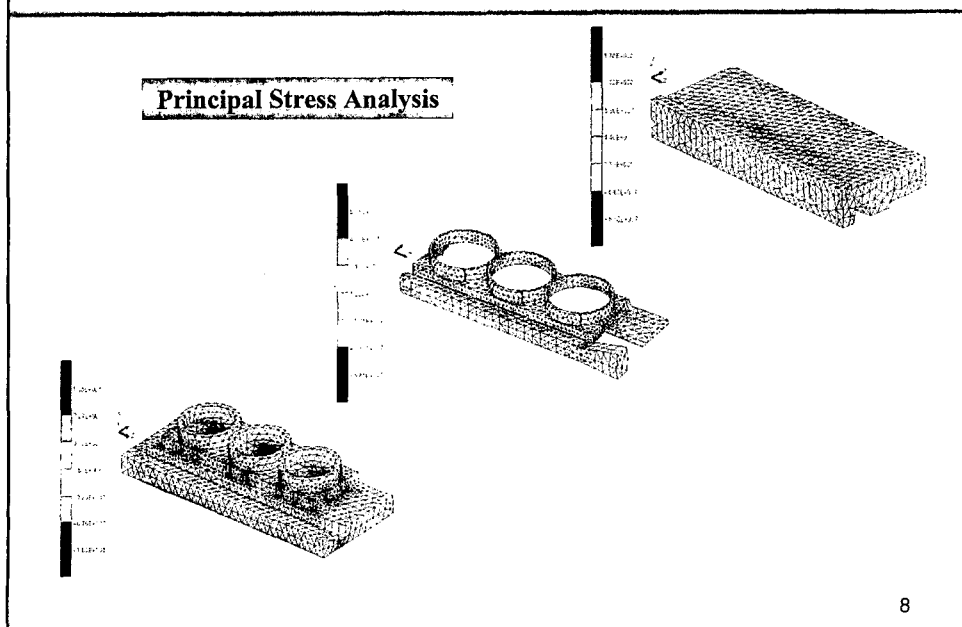
Modeling/ Mesh

6

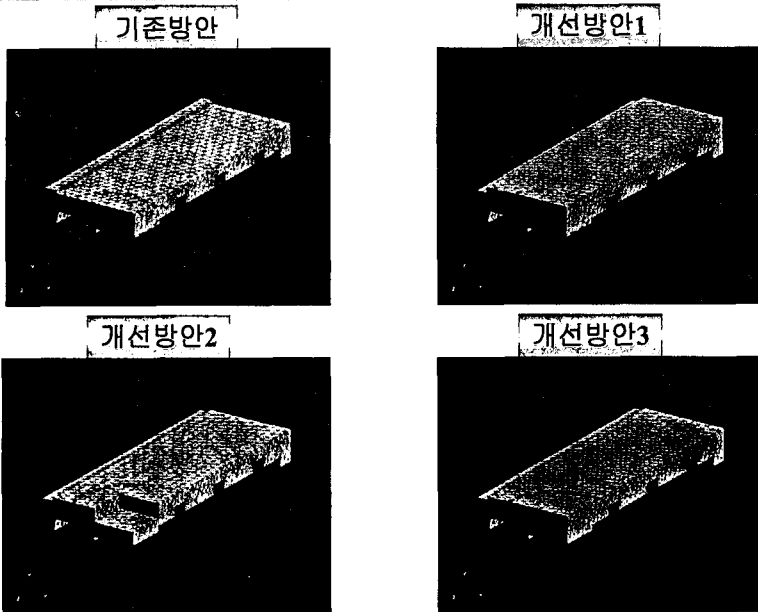
제품과 금형의 열응력 해석. Temperature/Deformation



제품과 금형의 열응력 해석 - Stress Analysis



제품과 금형의 열응력 해석 - Shape change



9

제품과 금형의 열응력 해석 - Deformation

표.1 각 측정 point에서의 Bulk head 상형에 대한 변형 해석 결과

Deformation (Y-axis) analysis of the Bulk head upper mold				
측정 Point	기존 방안	개선 방안1	개선 방안2	개선 방안3
Point 1	3.446E-003	2.830E-003	3.214E-003	3.186E-003
Point 2	3.458E-003	2.846E-003	3.226E-003	3.174E-003
Point 3	3.488E-003	2.882E-003	3.262E-003	3.198E-003

주조 응고 시 금형의 열응력 해석 결과 Y축 변위에 대한 측정 값을 비교해보면, 각 변위 측정 Point에서 개선방안1, 개선방안2, 개선방안3이 기존방안에 비하여 온도 분포에 의한 금형의 열변형을 줄일 수 있을 것으로 판단

10

제품과 금형의 열응력 해석- Deformation

표.2 각 측정 point에서의 Bulk head cast 에 대한 변형 해석 결과

Deformation (Y-axis) analysis of the Bulk head cast				
측정 Point	기존 방안	개선 방안1	개선 방안2	개선 방안3
Point 1	-1.212E-003	-1.229E-003	-1.212E-004	6.612E-004
Point 2	-1.205E-003	-1.223E-003	-1.207E-004	6.632E-004
Point 3	-2.028E-003	-2.416E-003	-2.028E-003	6.940E-005
Point 4	-2.220E-003	-2.258E-003	-2.220E-003	-9.324E-005
Point 5	-1.222E-003	-1.237E-003	-1.222E-003	3.704E-004
Point 6	-2.452E-003	-2.488E-003	-2.452E-003	-4.296E-004
Point 7	-2.128E-003	-2.162E-003	-2.128E-003	-9.645E-005

주조 공정 시 제품의 변형 해석을 수행한 결과, 다른 설계 방안과 비교하여 각 측정 point에서 개선방안 3에 대한 제품의 변형량이 가장 최소화 되는 결과를 얻을 수 있었다.

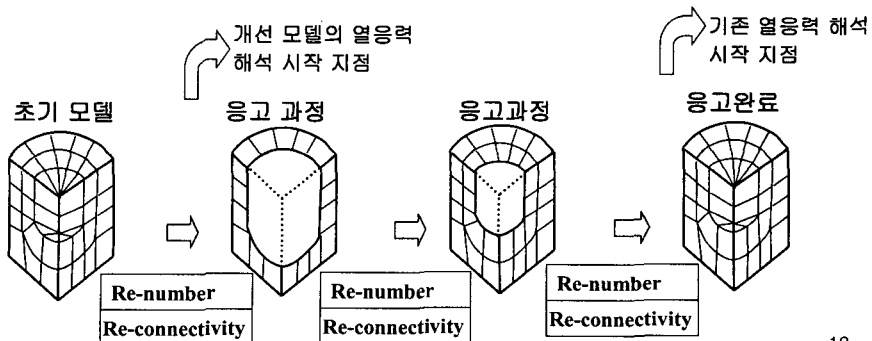
11

고상/액상을 고려한 열응력 해석

- 기존에는 모든 제품이 응고완료 후 열응력 계산시작
- 고상/액상이 존재하는 응고구간에서도 열응력 해석
 - 고상구역에 따른 해석영역(절점 number, 요소 connectivity) 재구성 필요
 - 고상 영역(해석 주 대상) 탐색 기능 요구



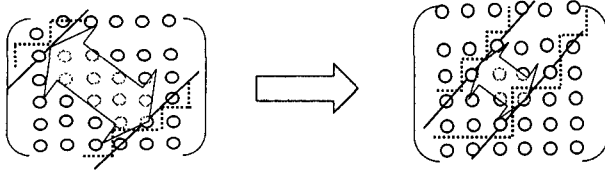
- 고상/액상 구역에서도 금형의 열전달 및 열응력 해석 가능



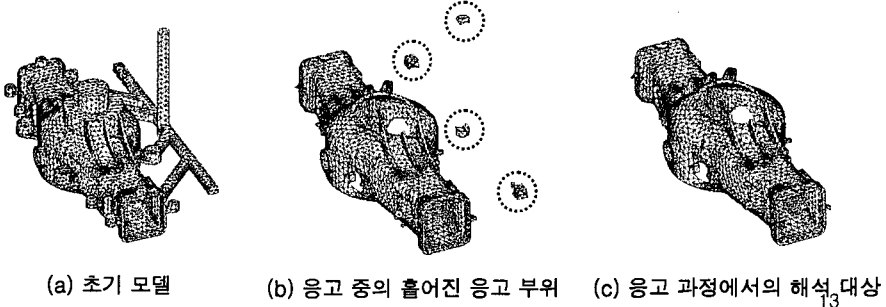
12

고상/액상을 고려한 열응력 해석

❖ Optimize numbering → Optimize Bandwidth(Profile)



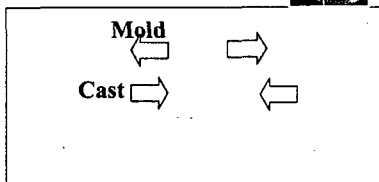
❖ 응고구간에서의 해석 주대상의 검색



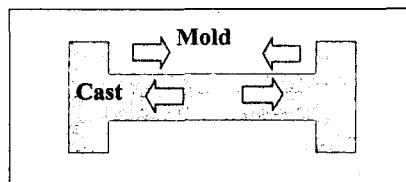
금형과 제품의 접촉을 고려한 응력 해석

❖ Constraints each other

- Thermal contraction of casting
- Thermal expansion of mold



Deformation shape

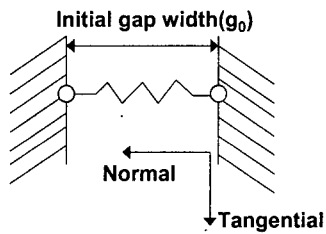


Stress appearance

Contact Element

A. Gap Element

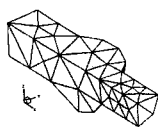
- 2 Node nonlinear element
- 3 degree of freedom at each node(u, v, w)



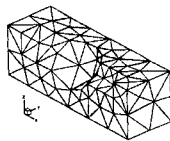
Gap function

Configuration of 2-D gap element

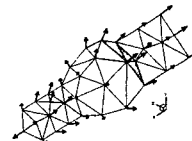
Input work for Contact



Cast part
(1/4 model)

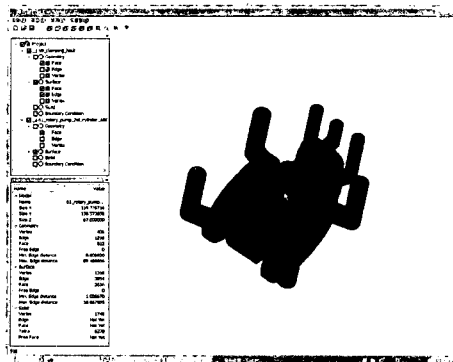


Mold part
(1/4 model)



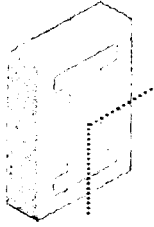
Normal vectors
on the contact zone

- The contact zone detection
 - The calculation normal vector on contact zone
- ↓
- Need for contact input work automatically in complex geometry or symmetry



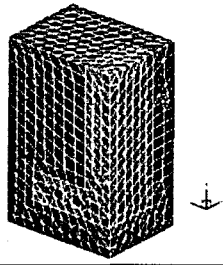
금형과 제품의 접촉을 고려한 응력 해석

-Numerical Example

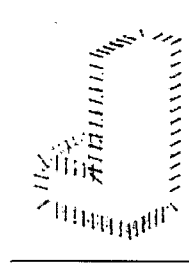


	Cast	Mold
Young's modulus	70GPa	200GPa
Plastic modulus	10GPa	100GPa
Yield stress	200MPa	400MPa
Expansion coefficient	20×10^{-6}	10×10^{-6}

- Geometry : I beam
- Dimension
600H×200W×100t[mm]
- Thermal load (cooled)
Cast : 500°C → 200°C
Mold : 200°C → 200°C



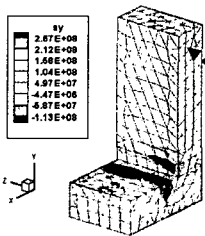
Mesh(1/8 model)



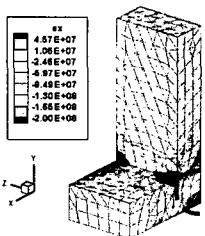
Normal contact vector

금형과 제품의 접촉을 고려한 응력 해석

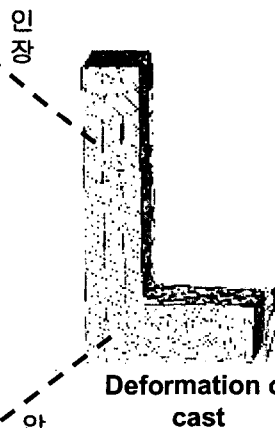
-Numerical Example



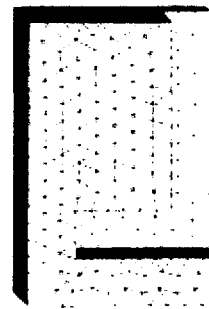
YY-direction Stress



XX-direction Stress

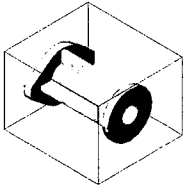


Deformation of cast

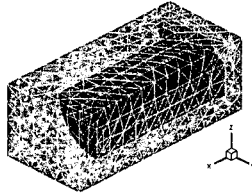


Deformation of mold

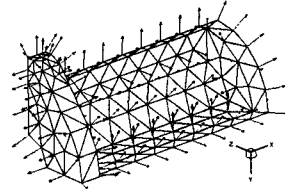
금형과 제품의 접촉을 고려한 응력 해석 -Application



**Geometry
(Cast&Mold)**



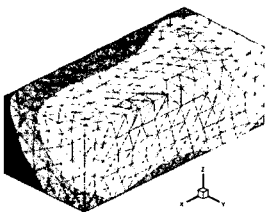
Mesh(1/4 model)



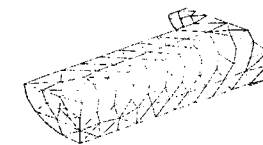
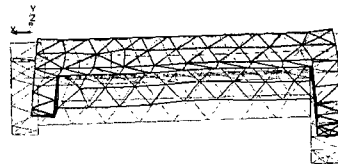
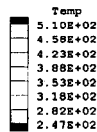
Normal contact vector

	Casting	Mold	Total
Element	525	2303	2828
Node	203	322	851
Material	AC4C	Cast Iron	
Condition	Pouring-Temp. 700°C	Initial-Temp. 250°C	

금형과 제품의 접촉을 고려한 응력 해석 -Application

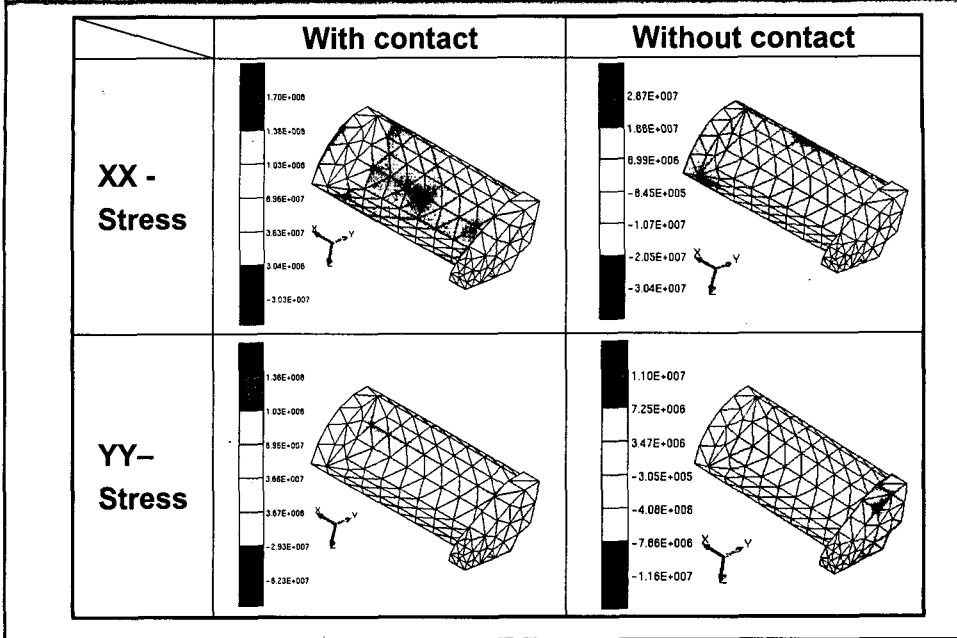


**Temperature distribution at 40
sec (After end of solidification)**



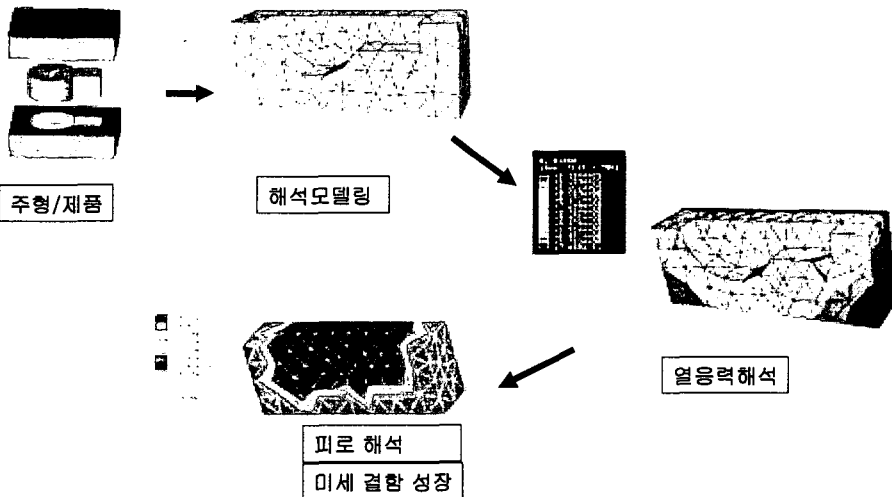
Deformation (at 2450 sec)

금형과 제품의 접촉을 고려한 응력 해석-Application

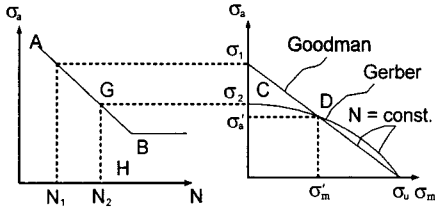


금형의 고온 피로/미세결함성장 예측

❖ 해석 절차



금형의 고온 피로 수명 모델

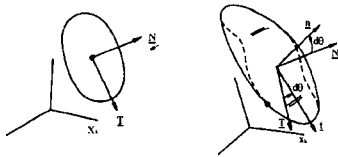


단축하중상태 ← 복합하중상태

등가응력접근법 (von Mises, Tresca)

- 1단계 : 주조 공정에 대한 금형의 열탄소성해석
- 2단계 : 금형 이력에 따른 온도 별 상당응력과 상당변형률을 계산한다.
- 3단계 : 각 절점에서의 최대, 최소 응력을 통해 응력주기를 구한다.
- 4단계 : 교번응력과 평균응력 관계식 (Goodman, Gerber Equation) 으로 등가 피로응력을 구한다.
- 5단계 : 응력-수명식에 의해 수명을 예측한다.

미세 결함 성장 예측



$$\omega = \omega_N N$$

- ω_N : 결함면에서의 결함밀도
- N : 결함면에서의 normal vector
- Helmholtz free energy is :

$$\rho\Psi = \frac{1}{2}(\lambda + 2\mu)\epsilon_{KK}\epsilon_{LL} - \mu(\epsilon_{KK}\epsilon_{LL} + \epsilon_{KL}\epsilon_{LK}) + \sum_{a=1}^{\infty} \sum_{b=1}^{\infty} (\omega_p^a \omega_p^b)^{-1/2} [C_1 \omega_K^a \epsilon_{KL} \omega_L^b \epsilon_{MM} + C_2 \omega_K^a \epsilon_{KL} \epsilon_{LM} \omega_M^b]$$

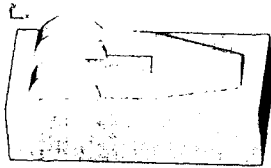
주조금형의 열탄성해석 결과

응력의 이력에 따라 결함성장결정

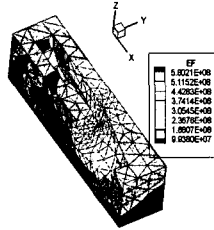
결함성장이 있을 때 초기값의 크기와 방향 추적

최종단계의 응력이력까지 왔을 때 취성결함의 Vector적 특성상 결함의 방향과 크기를 예측할 수 있음.

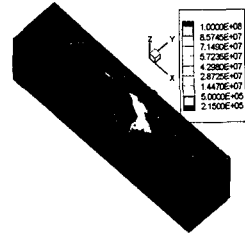
금형의 고온 피로/미세결함성장 예측



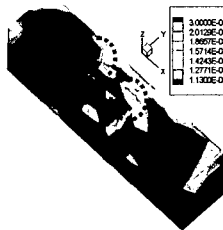
Socket 제품모델링



응력 해석



피로 해석

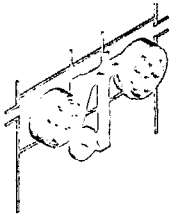


결함 크기(초기치 1.0E-4)

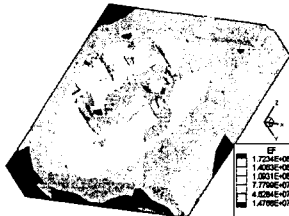


결함성장 방향 25

금형의 고온 피로/미세결함성장 예측



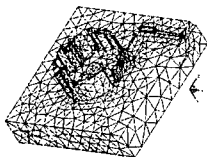
에어컨 압축기
제품모델링



응력 해석



피로 해석



결함 크기(초기치 1.0E-4)



결함성장 방향 26

Conclusion

❖ 향후 연구 방향

- 금형의 수명 예측 정확도 향상 - 고온 열충격 + 열마모 고려
- 다양한 공정 해석 - Die Casting/반복 Cycle 고려
- **User friendly** 프로그램
- 금형의 제작 - 주조에 의한 금형의 제조 및 열처리 공정에 대한 해석필요