

構造材料의 破壞 및 機能과 設計(VI)

(構造設計의 概要)

宋 森 弘

〈高麗大 工大 副教授·工博〉

1. 構造物設計 순서

構造物은 예정된 기간동안 構造物로서의 목적을 다하기 위하여는 性能 및 技能을 유지해야 한다. 이와같이 예정된 기간은 각 構造物에 따라서 다르다. 예를들면 댐과같이 예정된 기간이 매우 긴것이 있는가 하면 그렇지 않는것도 있다. 따라서 구조물들의 구조설계는 어떠한 순서로 행해지는가를 살펴보면 다음과 같은 순서가 되겠다(그림 참조).

(1) 아이디어 구성

요구되는 技能, 性能을 확인하고 그것에 적합

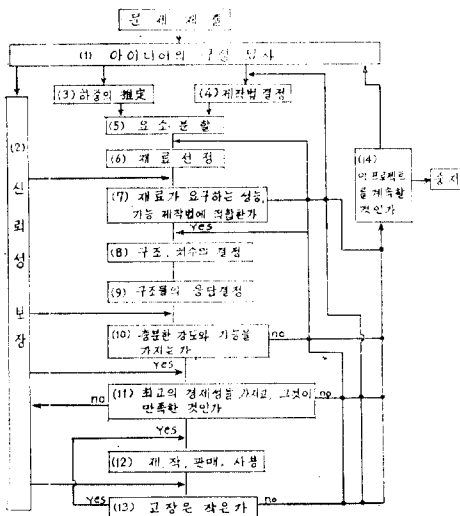


그림. 構造設計의 순서

한 構造物의 概略을 그린다. 이때 固體力學의 지식을 고려할 필요가 있다. 대개의 경우, 이 단계가 構造物에 대한 評價를 결정짓는 계기가 되므로 이러한 단계는 構造設計에서는 매우 중요하고 따라서 固體力學도 매우 중요한 부분이 된다.

(2) 信賴性的의 보장

製品의 신뢰를 보장하고 또 사용자가 제품에 대한 반응을 점검할 수 있는 構造가 된다. 또 製品자체 및 일부분의 豫想壽命을 결정할 수도 있다.

(3) 構造物에 加해지는 荷重 및 熱負荷등의 推定.

(4) 製造法의 결정

(5) 技能과 製法을 고려하여 構造物을 단순한 要素로 분할하고 각 要素에 가해지는 하중, 온도분포등을 推定한다.

(6) 材料 결정

構造物의 技能을 고려하고 材料의 強度, 加工性, 價格, 구입의 難易등을 고려하며 사용할 재료를 결정한다.

(7) 材料의 適定性

性能, 技能 또는 製法에 적합한 재료를 선택하지 못할때에는 그 構造物의 製造計劃을 포기해야 한다. 또 재료를 선택하는 관점에서는 製法을 수정해야 한다.

(8) 構造치수의 결정

경험등을 고려하여 각 構造要素의 치수를 결정한다. 또한 性能의 판정 및 經濟性を 基礎로

그값을 변경한다.

(9) 構造物의 應答

구조물이 荷重에 대한 應答을 조사한다. 그 方法으로서는

(a) 理論 해석: 構造物을 수학적으로 취급하기 쉽게 모델화하고 數學的인 觀點에서 應答을 검토한다. 系統的인 知識을 얻는데 유리하다.

(b) 模型 실험: 축척을 사용한 모형, 부분모형 등에 따른다.

(c) 實物 실험: 실제의 제품에 해당하는 것으로서 실험을 한다.

(10) 性能의 判定

材料의 性質을 기초로 다음과같은 觀點에서 判定한다.

(a) 強度: 製品 信賴性의 保障을, 전체로, 이것을 만족시키는 充足한 強度를 가지는가를 고려한다.

(b) 技能: 性能을 충분히 발휘할 수 있는 技能을 갖는가를 고려한다. 이경우의 대부분은 구조물 또는 그 要素가 荷重을 받았을때 變形하기 쉬운지의 여부, 즉 剛性을 考慮한다.

(11) 經濟性

(12) 製作, 販賣, 사용

(13) 故障에 대한 檢出

(14) 이 project를 계속할 것인가등의 順序로 整理해 보는 것이 좋겠다.

2. 微視的인 立場에서 巨視的인 立場으로

材料의 應力, 變形 기타의 物理的인 特性사이의 關係를, 材料를 구성하는 要素의 성질로부터 誘導하려고 한다. 여기에서는 有限要素法을 사용하여 성공한 예를 설명하겠다.

예를들면 單結晶의 舉動과 多結晶의 舉動을 연결시키는 것을 생각한다. 이경우 다음과 같이 5段階가 생각된다.

(1) 單結晶의 性質測定

(2) 多結晶體의 조건

(i) 粒界의 性質

(ii) 結晶粒의 舉動과 單結晶試料에서의 屈服 結果에 대한 차이.

(iii) 結晶粒의 상호작용

(3) 集合組織에 대한 情報

(4) 위의 사항들에 대한 平均 조작.

(5) 多結晶體의 能質에 대한 측정치.

여기에서 (4)의 平均 조작 대신에 각 結晶粒의 舉動을 有限要素法을 應用하여 조사하여 본다.

(例 1). 粗大結晶粒 알루미늄板의 슬립선.

알루미늄 99.9%의 粗大結晶粒을 가진 試驗片을 대상으로하고 3차원 有限要素法에 의하여 多結晶金屬의 變形 舉動을 측정한다. 한편, 粗大結晶粒 試驗片의 引張 시험을 실시하고 계산 결과와 비교하여 보면 그 結果는 잘 일치한다고 한다. 이경우, 結晶方向은 미리 X線으로 해석하여 놓는다. 즉, 基地의 結晶粒의 모양과 結晶方向을 갖는 結晶學的인 모델에 의하여 多結晶에 대한 舉動을 推定한다.

(例 2). 多結晶金屬에 대한 彈性係數

실제의 多結晶金屬은 多數의 結晶粒으로 되어 있고, 巨視的으로는 等方向 均質이라고 보아도 좋다. 그러나 結晶粒의 方向은 亂된다고 생각된다.

이때 結晶粒의 모양을 어떻게 할 것인가하는 문제가 있다. 그래서 여기서는 結晶粒의 形態로서 一定한 6角기둥을 생각하고 方向만 亂된 경우와 結晶粒의 形態 및 方向이 모두 亂된 경우를 豫測하여 취급하고 따라서 종탄성계수 E와 포아손比 μ 를 구한다.

(例 3). 연삭숫돌 재료의 탄성계수

연삭숫돌입자와 結合劑로 되어있는 多孔質複合材料로서, 巨視的인 척도에서는 均質, 等方體이나, 微視的인 척도에서는 構成된 成分이 亂된 것으로 混合된 非均質體라고 할 수 있다. 연삭숫돌을 구성하는 각 구성요소들의 機械的인 性質과 構成比率를 변화시키면 연삭숫돌의 機械的인 성질이 변한다는것은 경험적으로 이미 알려져있다. 여기서는 연삭숫돌의 微視的인 構造에 대한 모델화를 행한다.

따라서 이것에 의하여 前述한 지식으로부터 연삭숫돌에 대한 기계적인 성질을 定量的으로 평가하려고 한다.

연삭숫돌과 같은 分散強化系統의 복합체에 한

□ 連載講座

정식키더라도 다수의 해석적인 모델이 발표되어 있다. 그러나 이들 모델은 複合體의 彈性係數에 대하여 結晶學的인 예상을 하던지 또는 上下限의 값을 예상하기만 한다. 이때 예상한 값과 실제값과의 사이에는 큰 차이가 생긴다.

한편 연삭숫돌을 비롯한 非均質材料의 機械的인 性質은 根本的으로 어떤 分散性을 가지고 있다고 생각되고, 따라서 結晶學的인 예측보다 統計量(平均值, 分散)에 의한 評價가 바람직하다.

3. 材料에서 要素로(構造物의 模型)

構造物에 하중이 걸렸을때 구조물의 應答을 조사하는 순서에 대하여 생각해 보자. 應答을 조사하기 위하여 실물과 같은 구조물을 사용하고 實物과 동일한 상태에서 사용한다.

실제로 받고있다고 생각되는 荷重조건을, 상술한 構造物에 적용하므로써 實際 구조물에 대한 同一한 知식을 얻을수 있다. 이와같이 하여 얻어진 知식을 固體力學을 토대로 분석하고 판단하여 構成形態 또는 치수의 변경등을 할 수 있다. 즉, 새로운 構造를 갖는것에 대하여 마찬가지로의 실험을 반복하고 그 결과 고장이 없는 製品의 構造를 결정할 수 있다.

이와같은 실험은 제품의 構造樣式이 복잡하더라도 적용할 수 있고 構造뿐만 아니라 다른 性能에 대하여도 동시에 거의 精確한 知識을 얻을 수 있으므로 매우 좋은 방법이다.

그러나 많은 경비가 소요되므로 비행기와같은 높은 信賴性이 요구되는것, 또는 同一製品을 대량 제작함에 따라 한개의 제품을 개발하는데 필요한 경비가 매우 적을때에 한해서 이 방법은 채택된다.

이론적으로 구조물의 應答을 조사하기 위하여 다음과 같은 순서를 밟는다.

- (1) 構造物의 理想化
- (2) 理想化된 構造物을 流形別 一般 要素로 구분한다.
- (3) 要素에 대한 應答을 종합하고 理想化된 構造의 전체로서 應答을 결정한다.
- (4) 理想化의 수정(特殊要素)

(5) 상술한 (3)과 (4)를 종합하여 構造物의 應答을 결정한다.

단순한 一般要素로서는 圓은棒, 円形 혹은 長방형의 平板, 円筒曲面등이 있다. 특수요소인 應答으로서 중요한 것은

- (a) 荷重이 걸리는점 부근의 應力分布
- (b) 모양이 급격히 변화할때 동반하는 應力의 異狀分布(應力集中)
- (c) 접촉점의 힘의 전달(접촉에 대한 문제)등이 있다. 또 構造物의 強度를 생각할때 脆性破壞 혹은 疲勞破壞가 일어날 때에는 應力集中이나 接觸의 문제가 결정적인 역할을 하고, 座屈, 塑性變形에는 일반요소의 성질이 현저하게 영향을 미친다.

4. 要素로부터 構造物에(構造設計의 諸因子)

구조물은 요구되는 性能과 技能을 가질수 있도록 설계되어야 한다. 또한 충분한 經濟性과 強度를 가지고 있어야 한다. 이러한 경우에 考慮해야 할 점은 다음과 같다.

- (a) 經濟性
 - (1) 材料, (2) 重量, (3) 製作法, 製作費
 - (4) 構造양식
- (b) 構造
- (c) 구조설계
- (d) 構造치수등이 있다.

構造設計에 있어서는 經濟性과 強度가 매우 중요하다. 荷重에 대한 構造物의 應答을 결정하고 構造物에 발생하는 最大應力 또는 構造物을 破壞시키는 荷重이 결정되었다고 하자.

荷重과 構造物의 性質을 고려하고 信賴性의 관점에서 安全率을 결정한다. 또 계산으로 얻어진 最大應力이나 破壞荷重이 그 安全率에 적합하도록 설계할 필요가 있다.

構造物은 構造物에 걸리는 모든 荷重에 대하여 強度를 검토하는것은 불가능하므로 荷重을 形態에 따라서 流形的으로 分類하고 信賴性을 기초로 強度基準을 정하고 설계하고 있는게 현실정이다. 예를들면

(1) 대부분의 기계는 振動을 받을때 疲勞破壞가 일어나지 않아야 한다.

(2) 일반적인 사용상태에서 받는 靜荷重 및 變動荷重을 받았을 때에도 破壞되지 않아야 한다. 또한 塑性變形이 일어나지 않던지, 일어나더라도 점검 할 수 있도록 한다. 荷重이 반복되는 數가 많을때에는 低사이클 疲勞破壞가 일어나지 않도록 설계한다. 크리이프變形에 대해서는 許容限界를 정한다. 또 보통은 座屈도 일어나지 않도록 한다.

(3) 거의 負荷되지 않는 경우에는 經驗的으로 荷重의 크기에 限度를 설정하고, 그 限度內의 荷重에 대하여는 심한 塑性變形등이 발생하여 技能이 정지되지 않도록 한다.

(4) 일반적인 사용상태하에서 특히 荷重이 걸리지 않는 部品에 대하여는 충돌등을 예상하고 어떤 加速度에 의한 慣性力을 고려하여 充分한 強度를 가지도록 할 것 등의 기준이 사용된다. 또한 強度를 생각할때 材料, 치수등을 적당히 선택함에 따라서 이것을 피할 수 있다.

일반적으로 靜荷重에 대하여는 降伏點, 또는 抗張力을, 反復荷重에 대하여는 疲勞限度를, 壓縮荷重을 받는 要素에 대하여는 座屈應力을 기준으로 경험적으로 安全率을 결정하여 이것으로서 基準強度를 나누어 許容應力으로 한다. 그래서 이 값이 彈性計算에 의하여 얻어진 應力보다 작도록 설계하고 있다.

또한 抗張力을 이 許容應力으로 나눈 값을 편리상 安全率로 보고 설계할 때가 가끔 있다. 이와같이 便利上의 안전율은 強度의 Scattering등에 대한 여유에 대하여는 考慮하지 않고 있다. 따라서 許容應力 또는 편리상 안전율은 構造物內에 應力이 발생하는 위치등에도 관계된다.

5. 材料의 設計

5.1 金屬材料의 微視的인 強化機構

구조물의 설계에 있어서, 사용되는 材料에는 가끔 力學的인 性能이 요구된다. 즉, 變形에 대한 抵抗, 強度와 破壞에 대한 安全性이 문제가 된다. 材料의 기능으로서는 사용도중에 결함이

나타나지 않는것이 바람직하다. 그러나 材料에는 製造나 加工上의 문제, 經濟性의 문제등 制約이 많아서 항상 최고의 기능을 발휘할 수 있는 材料를 선정한다는 것은 어려운 일이다. 이와같은 것을 고려하여 設計要求를 만족하는 最適의 強度와 破壞抵抗을 갖는것을 선택하게 된다.

대표적인 金屬材料를 예로들면 다음과 같다. 強度가 높은 材料라는 것은 어떤 微視的인 構造를 갖는가를 생각하여 보자. 여기에서 構造의 관점에서, 金屬에 대한 微視的인 強化機構를 알 수 있다면 上述한 性質을 理解하는데 매우 도움이 될 것이다.

5.2 強化機構

基本的인 強化機構에는 다음과 같은 機構로 大別할 수 있다.

(a) 固容強化 : 固容原子, 點결함에 의한 強化

(1) 置換型固容 : 例, 鋼의 경우, Mn, Si, Ni, Mo등

(2) 侵入型固容 : 例, 鋼의 경우, C, N등

(b) 分散強化 : 粒子, 第2相의 分散에 의한 強化

(1) Coherent粒子 : 母相과의 境界面에 整合된 粒子에 따른다.

(2) Incoherent粒子 : 母相과는 格子連結이 없는 粒子에 의한다.

(c) 粒界強化 : 結晶粒의 境界, 粒徑에 의한 強化

(1) 大에너지 粒界

(2) 小에너지 粒界 : Sell構造등에 의존하는 強化

(d) 轉位密度強化 : 轉位密度에 의존

(1) 均質轉位密度 : 塑性變形에 의한 비교적 均質인 密度上昇이 있는 경우

(2) 不均質轉位密度 : Sell構造, 面積, 결함 등에 의하여 密度가 不均質인 경우등을 들 수 있다.

6. 材料가 가져야할 性質과 材料設計

力學的인 計算에 의하여 構造物을 設計할 때,

□ 連載講座

사용材料的 力學的인 性質을 Data로서 도입한 다.

예를들면 σ_a (許容應力)은 단순한 靜的인 引張荷重일때의 σ_y 를 安全係數로서 나눈 形態로서 처리된다. 그러나 현실적으로 구조물에는 加工의 문제라든지, 內部결합때문에 應力集中, 多軸應力, 壓縮力에 의한 不安全性(座屈), 反復應力, 환경영향등 여러가지가 構造物의 安全度를 低下시키는 方向으로 작용한다. 따라서 材料는 각종 조건에 따라 力學的으로 어떻게 對應하는가 하는 性質을 상세히 알아야 한다.

이러한 문제와 관련시켜 構造設計上 요구되는 性質에 比하여 材料를 어떻게 선택, 설계해야 좋은가 하는 문제를 생각하여 보자.

鋼은 Fe에 C, Mn, Si, Cr, Ni등의 合金元素에 의하여 強化되고 또 熱的인 履歷(熱處理)에 의하여 각종 組織이 얻어진다.

또한 微視的인 組織과 性質과의 관계가 定性的 및 定量的으로 把握 할 수 있다면 要求되는 性質에 알맞는 材料의 선택과 設計가 可能할 것이다. 따라서 強度에 대하여는 前述한 基本的인 強化機構에 의하여 強化鋼의 內容을 해석하여 고찰할 수 있다. 그러나 실제 構造設計上 安全係數나 破壞에 대한 抵抗이 충분한지의 여부를 확인해 보면 이것들은 微視的인 組織 및 構造에 매우 민감한 性質을 갖고있어 定量的으로 把握하는 것은 매우 곤란한 경우가 많다.

合金元素나 熱處理의 선택은 우선 強度나 靱性, 延性 및 加工性등 目的에 대한 性質을 얻는데 適當한 強化機構를 갖인 組織을 선택함에 따라 결정된다.

強度와 延性, 靱性등 서로 다른 性質을 어떻게 調和시킬 것인가 하는것은, 理論的 및 經驗的인 과거의 知識의 蓄積과 試驗片에 의한 연구결과와 實用構造에 의한 破壞시험결과에 의하여 얻어진 知識과를 綜合的으로 檢討함으로써 材料의 처방이 행해진다.

가스를 大量으로 수송하는 매우 큰 지름을 가진 파이프 라인을 생각하여보자. 경험에 의하여 壓延한 그대로 사용할 수 있는 性質을 가진 鋼板을 굽혀서 용접하여 使用한다. 降伏強度는 45

kg/mm²이고 그것도 低溫 靱性이나 加工性이 좋은 것이 要求되고, 보통 延鋼의 20kg/mm²정도의 強度에 比하여 倍以上의 高張力鋼이 요구된다.

組織은 페라이트의 多結晶體를 주로 생각하여 우선 經濟的인 合金成分 Mn의 1%~1.4%에 의한 固容強化와 結晶粒의 微細化를 피하면, 靱性的인 관점에서 매우 유리하다. C%는 작은 것이 좋으나 製作上 0.1% 정도로 하는것이 좋다.

結晶粒의 微細化에 대해서는 冶金學的인 研究結果를 利用한다.

Nb를 0.04% 함유시키고 또 壓延 다듬질에 가까운 壓下率과 溫度를 잘 조절함에 따라서, 微細한 結晶粒을 만드는 技術이 개발되었다. 이 技術은 熱處理와 加工을 組合함으로써 얻어진다. 예를들면, 하나의 質量이 큰 強力軸 材料를 생각하여 보자. 回轉力을 傳達하기 위한 材料로서는 100kg/mm²이상의 降伏強度가 요구되며, 反復應力에 대하여는 安全上 耐久限度는 50kg/mm²이상이 要求된다.

強度를 向上시키기 위하여 담금질 템퍼링을 한 말텐사이트組織이 필요하고 破壞에 대해서도 脆性을 나타내지 않는것이 요구된다. 質量이 크기 때문에 急熱處理를 하여도 內部的 冷却速度가 낮고 말텐사이트組織을 얻기 힘들다. 따라서 熱處理效果를 좋게하는 合金元素 Cr, Mn등을 配合해야 한다. 이것은 經驗的인 法則에 따라서 成分을 定量的으로 선택할 수가 있다. 그러나 약간 不완전한 組織이라 하더라도 靱性을 유지하도록 Ni Mo등의 合金元素를 첨가하는 熱處理가 선택된다. C는 強度와 破壞抵抗의 平衡을 고려하여 0.2~0.3% 정도가 適當하다고 한다. Ni量이 10~25%보다 많이 配合될 경우에는 C는 오히려 낮은 b.c.c. 말텐사이트組織이 바람직하다.

그래서, 時効에 따른 Mo, Ti등의 金屬間化合物이 析出分散強化를 이용한 超強力鋼, 예를들면 말레이징鋼등이 開發되어 있다. 強度가 높은 材質에서는 특히 內部에 含有되는 不純原素나 異狀介在物 成分 偏析등 소위 冶金學的인 要因이 破壞現象에 매우 민감하다.