

## 구조설계에서의 재료의 경제적 이용

### Economic use of Material in Engineering Design

송 윤 섭  
Y. S. Song



송 윤 섭  
• 1954년 8월생  
• 수송체계 설계 및 신뢰성  
평가기술  
• 정회원, 부산수산대 공대

#### 1. 서 론

구조물의 설계에서는 성능향상, 안전성(또는 안정성) 그리고 경제성이 주된 관심사항이 된다. 특히 항공기, 자동차 등의 수송체계는 이들이 갖는 사회 공공적 특성 때문에 여타의 구조물과 달리 어느 한 쪽을 강조하기보다는 구조의 안전과 더불어 성능향상 그리고 경제성을 가능한 한 최대로 충족시키려는 절충작업이 설계과정에서 이루어지고 있다.

특히 설계과정에서 재료는 재료선정에서부터 시작하여 재료특성 평가, 제조 공정, 마케팅에 이르기까지 여러 분야와 관련되며 재료의 효율적 사용이 결국 제품의 경제성과 직결된다는 점에서 매우 중요한 역할을 담당한다.

본 연구는 자동차, 항공기 등의 수송체계의 설계에서 재료가 적용되는 과정을 통하여 설계에서의 재료의 기능 및 역할을 살펴보고, 최소의 비용으로 기능요건을 최대로 충족시키는 경제적 설

계가 될 수 있도록 의사결정을 지원해주는 몇가지 분석기법을 소개하기로 한다.

#### 2. 구조설계에서의 재료의 기능 및 역할

##### 2.1 구조설계시 고려사항

자동차, 항공기와 같은 수송체계의 설계에는 일반적으로 기계, 항공, 금속, 전기, 전자, 섬유, 도료 등 각종 공업 부문이 유기적으로 관련되어, 설계자의 오랜 경험과 풍부한 지식, 정확하고 과학적인 근거 또는 직관이 어우러져 설계가 이루어진다.

그러나 Fig.1에서 보는 바와 같이 수요와 요구조건을 만족하는 다양한 요소 혹은 정보를 개발 대상 구조물 자체에 대한 지식으로 변환시키는 일련의 과정에서 정부와 관련기관이 요구하는 여러 규정을 포함한 요구조건이나 제한조건을 만족시키면서 설계하고자 하는 구조물의 성능과 형상을 결정하는 수많은 변수들을 최적의 값으로 이끌어내기란 용이한 작업이 아니다.

따라서 만족스러운 설계가 이루어지기 위해서는 Fig.2에서 보는 바와 같이 기능 및 수요상의 요구사항, 재료특성 그리고 제조공정 등을 면밀히 고려하여야 한다<sup>1)</sup>. 즉, 제작해야 할 제품의 환경 및 그 제품이 어떠한 요구조건에 의해 구속되었을 경우 사용 가능한 재료, 목표 단가 그리

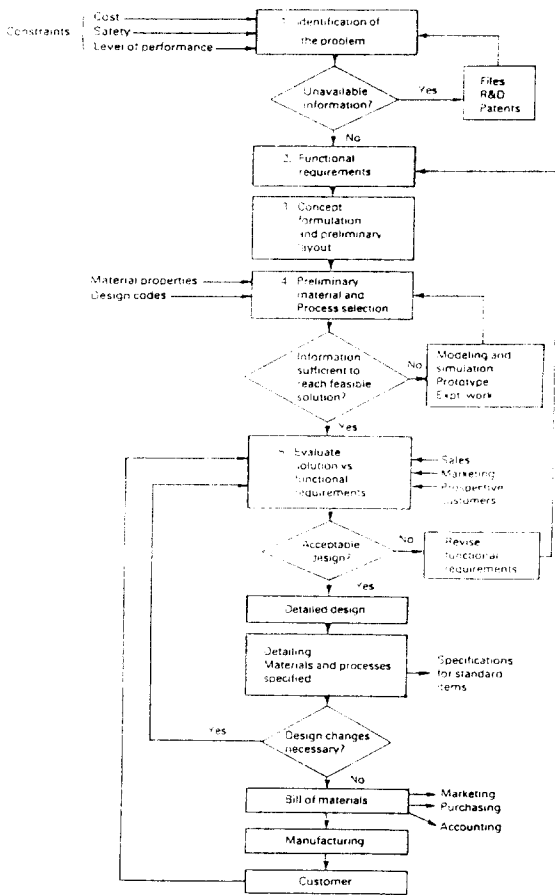


Fig.1 Major phases of design

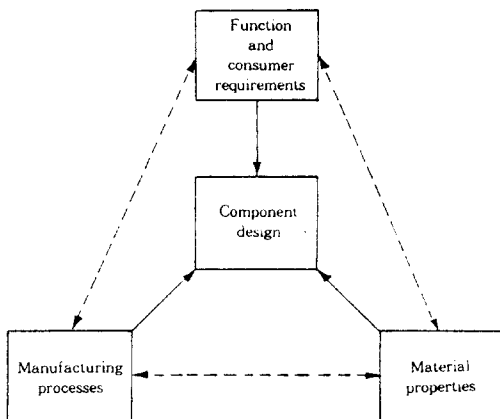


Fig.2 Factors that should be considered in component design

고 부가에 관한 자료가 주어졌을 때 기본설계가 시작될 수 있다. 가장 적합하다고 판단되는 기본 설계개념을 설정한 후에 해석, 실험 및 시제품 제작과정을 거친다.

특히 재료의 경우 완제품에 있어서의 재료특성과 그 제품을 만들기 위해 사용한 원재료의 성능과는 상당히 차이가 있기 때문에 설계와 재료의 상관성을 매우 복잡하다. 따라서 Fig.3과 같이 부품의 재료특성과 관련하여 원 재료의 특성, 제조 방법 그리고 부품 기하학과 외력사이에서의 직접적인 영향과 이들 요소 상호간의 상관성을 고려하여야 한다.

## 2.2 구조설계와 재료특성

부조부의 설계에서 재료가 적용되는 과정은 보통 재료의 선정, 선정된 재료에 대한 특성 평가, 특성평가를 통해 얻어진 자료의 설계공정에의 투입 그리고 출력된 자료의 신뢰성을 확인하기 위한 시험 및 평가 등을 들 수 있다. 이들 과정에서 여러 가지 경제적 그리고 기술적 요소에 의해 평가가 이루어져 최종 결정된다.

먼저 사용할 재료의 선정을 위하여 각 재료의 장, 단점을 고려한 가용도 분석을 실시한다.

자동차에 사용되는 재료는 매우 다양하며 크게 금속재료, 세라믹 재료, 플라스틱 재료, 복합소

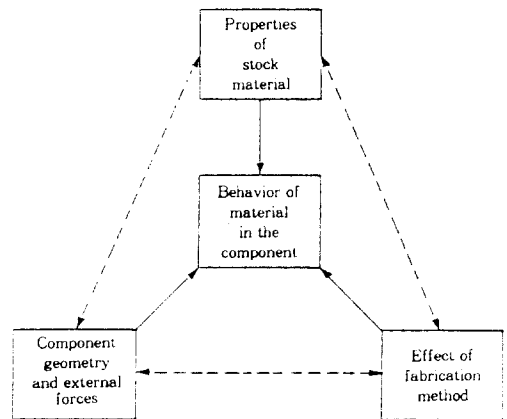


Fig.3 Factors that should be considered in anticipating the behavior of material in the component

재 등으로 구분할 수 있다.

이중 세라믹 재료의 경우에는 우수한 내열성, 저 비중과 뛰어난 비강도 특성 등의 장점을 가지며, 플라스틱 재료의 경우에는 저 비중, 우수한 성형가공성 등의 장점을 갖는다. 특히 연비향상과 배기가스 저감기술과 관련하여 연구되고 있는 재료로는 Al 합금, Mg 합금과 티타늄 합금, 복합소재등이 있다. 이들 신소재를 이용한 설계는 경량화 이외에도 소음 저감, 부식방지, 내구성 증가 등 부수적으로 많은 장점을 지니므로 신소재를 이용한 차체의 경량화 설계 연구가 활발히 진행되고 있으나, 대체재료에 적합한 재료시스템을 확립하기 위해서는 신소재의 기계적 성질을 비롯한 여러 특성 평가를 위한 공정한 기법의 정립이 선행되어야 한다. 또한 재활용 가능성, 설계를 위한 신뢰성 구축, 가격 경쟁력, 공급의 안정성이 충족되어야 하며, 특히 기존 재료와 비교하여 우수하여야 한다.

그러나 아직 이들 소재들은 기능적 소재로서의 일반화를 위한 선형 및 비선형 기계적 거동특성에 대한 보편화가 이루어지지 않고 있으며, 현재 금속 구조에서 필요로 하는 만큼의 안전도 수준에 도달해 있지 않다. 따라서 이들 재료 특유의 장점을 살려 우수한 자동차 구조의 설계/개발을 위해서는 더 높은 기술적인 배경과 비용부담이 요구되고 있는 실정이다<sup>3, 9)</sup>.

일단 구조물에 사용할 재료가 선정되면 규정에서 정한 규격을 만족시킬 수 있도록 설정된 환경조건에서 신뢰할 수 있는 기계적 특성을 얻어야 한다. 즉, 사용소재의 적합성을 확인하기 위한 특성 평가를 수행하여야 한다. 이러한 소재의 적합성 평가는 크게 설계 허용치 시험과 구조증명을 위한 피로시험 등으로 이루어진다<sup>4)</sup>.

설계 허용치를 설정하기 위해서는 환경의 영향과 손상의 영향이 고려되어야 한다. 즉, 적절한 기초설계 자료를 제공하기 위해서는 재료의 설계특성에 대한 환경적 영향이 수립되어야 한다. 사용되는 재료의 습도와 온도를 포함한 극한 환경조건을 확인할 수 있는 환경설계기준이 수립되어야 하며, 재료설계치 또는 허용치가 사용기간중 예측되는 극한 환경조건에서 신뢰할 수

있다는 것을 보여주는 실험적 증거가 있어야 한다. 또한 설계허용치를 설정할 때는 극한환경 조건과 함께 손상의 영향을 고려하여야 한다.

또한 피로시험은 소재의 적합성을 평가하는데 있어 주요한 시험중의 하나이며 균열성장의 초기 탐지는 고속 수송체계와 같이 비선형 구조물에 있어 치명적인 고장을 예견하는데 특히 중요하다.

정적 강도, 피로와 강성의 특성들에 대한 운용 환경의 영향은 그 재료에 있어서 배가된 시험 또는 적용가능한 운용자료를 통하여 결정되어야 하므로 환경조건을 설정하기 위한 오랜 기간동안의 자료축적과 분석이 필요하며, 이러한 반복적 환경조건하에서의 영향을 파악하여야 한다. Fig.4는 경량화, 고강도, 고강성, 내손상성이 우수하여 수송체계의 구조설계 특히 항공기 날개구조에 많이 사용되고 있는 Al 7075 합금에 대한 피로 시험 결과의 대표적인 예이다.

소재의 적합성 평가를 통해 만족스러운 자료가 얻어지면 설계상의 여러 제약조건을 고려하여 이를 설계공정에 반영한다. 설계를 위한 기술선택, 치공구 선정 등 특정 장비 및 공정흐름의 선택이 이루어지며, 이때 정보, 에너지, 자본 및 인력이 결합되어 투입물을 산출물로 변형시키는 일련의 작업이 이루어 진다. 구조의 제작을 위해 설계과정에서 세부부품 제조공정, 조립공정과 검사방법이 선정되어야 하며 이들의 선정은 비용, 기능면, 제조성, 검사성을 고려하여야 한다.

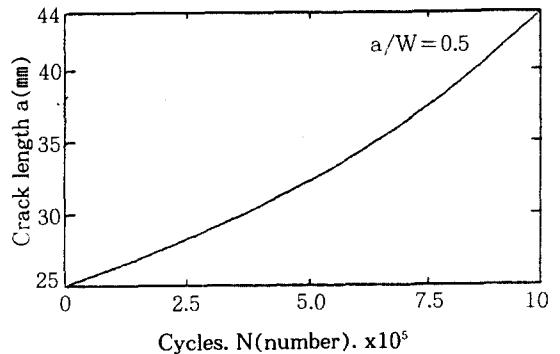
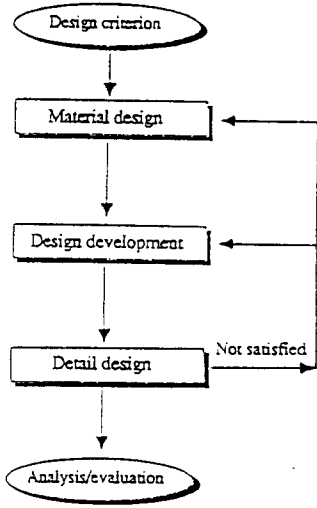
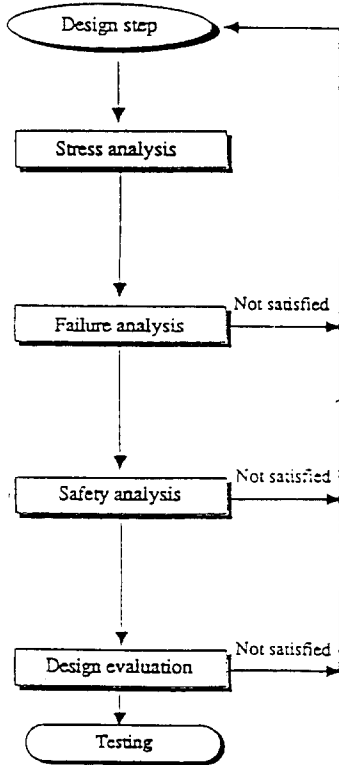


Fig.4 Typical relationship between fatigue cycle and crack length



(a) Design phase



(b) Analysis and evaluation phase

여러 번의 반복과정을 거쳐 요구되는 최소한의 기준이 만족되고 형상, 구조 및 시스템이 통합되고 전개된다.

설계된 구조물이 설계 요구조건을 만족하는 가를 입증하기 위하여 응력 해석을 수행하여 내구성과 신뢰성을 평가하고 구조의 기능적 특성을 충분히 만족시키는 설계가 얻어질 때까지 반복하여 수정 설계를 시행한다. 수정된 설계가 얻어지면 시제품을 제작하여 부품 수준의 성능 시험과 탑재후 노면 시험을 실시하여 실용화 생산 이전에 충분한 보완 설계를 수행한다. 이러한 구조해석 및 시험은 설계와 별개로 시행할 수 없고 제 단계의 설계 절차에서 상호 보완적으로 작용한다.

이상에서의 수송체계의 설계과정을 요약하면 Fig.5와 같다.

### 3. 재료의 경제성 평가

#### 3.1 설계과정에서의 의사결정

설계과정에서의 의사결정은 단순한 논리나 경험적 요소 또는 직관력에 의해서만 이루어질 수 없으며, 대안적 사고와 미래지향적 사고에 의한 과학적 분석을 필요로 한다.

따라서 합리적인 의사결정을 내릴 수 있게 하기 위해서는 그 사업계획이 목표로 하는 산출결과에 대한 적절성, 적합성, 효과, 효율, 파급효과 등의 요소에 대한 평가분석이 선행되어야 하며, 또 그 결과에 대한 사후점검 및 확인분석이 이루어져 차기 계획에 반영시킬 수 있는 환류기능이 활성화되어야 한다.

구조물의 설계에 사용되는 재료의 선정이나 대체등 막대한 자본의 투자를 요하는 의사결정에 있어서의 일반적인 절차는 1) 성능 요건에 대한 분석, 2) 대안 개발, 3) 대안 평가, 4) 최적안의 결정이며, 최적안에 대한 최종결정은 경제분석 혹은 기술분석에 의존하고 있다.

대표적인 경제분석기법으로는 손익분기분석, 비용분석, 가치분석, 비용대 효과분석 등이 있다.<sup>5,6)</sup>

#### 3.2 가치 분석에 의한 재료선정

제품설계는 고객이 만족할 수 있는 제품의 기

Fig.5 Typical design process for car body structures

능적 요건을 수행할 수 있는 수준에서 가장 경제적으로 생산할 수 있도록 설계하는 것이 중요하다. 따라서 제품의 정상적인 수행기능과 비용을 고려하여 제품설계를 하여야 한다. 이러한 제품설계의 특성을 고려하여 제품기능을 충실히 수행할 수 있고 생산비용은 최소로 하기 위한 기법이 가치분석이다.

가치분석에서 가치는 비용과 기능과의 관계로서 다음과 같이 표시한다.

가치(Value) = 기능(Function)/비용(Cost),

$$V = \frac{F}{C} = F_B + F_S$$

여기서  $F_B$ 는 기본기능이며,  $F_S$ 는 2차적 기능을 의미한다.

다시말하면 가치분석은 기능에 대한 비용의 적합성을 비율로 포착하여 이를 가치지수라고 부르고, 이것을 사용하여 가치의 타당성을 판단하는 것이다.

가치분석을 수행하는 절차를 요약하면

- (1) 분석대상의 선정
- (2) 정보의 수집
- (3) 기능분석 및 정의, 아이디어의 제안
- (4) 적합성 검토
- (5) 기능의 평가
- (6) 제안
- (7) 적용

의 단계로 이루어진다.

가치분석의 핵심은 앞에서 살펴본 바와 같이 기능과 비용의 분석에 있으므로 전형적인 가치분석은 일련의 질문을 통한 기능분석을 수행한다.

즉, 그것은 무엇인가? 그것의 기능은? 비용은 얼마인가? 그것의 가치는 무엇인가? 다른 어떤 것이 그 기능을 수행할 수 있는가? 그것은 단순화될 수 있는가? 그것은 꼭 필요한가? 등의 기능적 접근이 중점적으로 전개된다.

이와 같이 가치분석은 최초의 설계에서도 중요하지만 재설계, 작업방법의 변경 그리고 부품 및 자재의 선정에서도 역시 유용하다. 예를 들어 탄소강을 가치를 추정하는 참조점으로 채택하여 재료 선정의 기준으로 사용할 수 있다. 이 기준강

보다 높은 다른 강은 면밀히 분석해야 한다. 이때 잉여비용의 각각의 항에 대한 가치를 그 부품이 수행하고 있는 서비스의 일부분인 기능과 관련하여 검토하여야 한다. 최저의 비용으로 요구 기능을 수행하는 재료의 하나를 선정하기 위하여 재료를 비교할 경우에는 보통

1) 가장 저렴한 비용에 입각하여 재료의 선정

2) 조금 비싸지만 제조과정이 간단하거나 혹은 공정을 단축할 수 있는 재료의 선정과 같은 두가지 대안을 놓고 선택이 이루어진다.

가치, 기능 그리고 비용의 함수에 의한 비교분석을 통해 기능분야마다 그 평가치가 정해지고 현재의 기능별 코스트를 알 수 있다면 기능마다 가치지수와 개선 여지가 확실해질 수 있다.

### 3.3 요소비용에 대한 비용분석

제품의 가치를 높이기 위해서는 가치를 구하는 공식에서와 같이 기능은 최대로, 비용은 최소로 하는 것이다. 비용과 기능은 비교한 가치척도가 없이는 어떤 설계가 가장 경제적인 설계인지를 판단할 수 없다. 필요한 기능을 만족시켜주면서 최소의 비용으로 설계할 수 있는 대안을 찾아내는 데는 많은 시간과 노력이 요구된다. 따라서 제품을 최소의 비용으로 생산할 수 있는 여러가지 대안을 검토할 수 있는 정보로는 코스트 테이블(Cost table)이 이용된다.

코스트 테이블은 제조의 전체과정을 해석하여 만들어지는 것으로, 예를 들어 제품설계를 할 때 설계목적에 맞도록 소재선택이나 제품의 속성에 따른 여러가지 대안들 중에서 재료비, 가공비용, 시간 등의 표준비용을 고려하여 선택할 수 있도록 비용과 관련된 특성들을 집대성한 표이다.

일단 재료가 선정되어 구매결정이 내려지면 재료비용이 제품의 총비용에서 차지하는 비율이 높기 때문에 비용을 최소화하기 위한 방안을 찾기 위해서는 여러 관련요소에 대한 분석이 필요하다. 이러한 비용분석은 Fig.6과 같이 원재료가 점차적으로 완제품으로 전환하는 일련의 과정을 고려하여 이루어진다.

Table 1은 반제품으로 전환하는데 소요되는 비용에 대한 요소분석의 예이다.

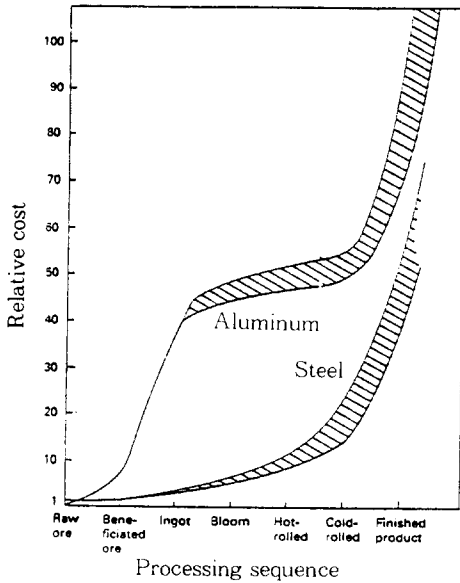


Fig.6 Build-up of material cost with the progress of manufacturing process

Table 1 Cost analysis in a cast iron foundry

Item	Cost \$/casting	% of total cost
Metal	4.40	35.9
Mold and core	1.80	14.7
Clean and sort	0.53	4.3
Heat treat	0.56	4.5
Hand tool finish and gring	1.30	10.6
Inspect	0.12	1.0
Ship	0.05	0.04
<b>Total direct cost</b>	<b>\$ 8.76</b>	<b>71.4</b>
<b>Overhead and administration</b>	<b>\$ 3.50</b>	<b>28.6</b>
<b>Total cost</b>	<b>\$ 12.26</b>	<b>100.0</b>

### 3.4 재료이용의 손익분기분석

손익분기분석은 비용, 수익 및 생산량과의 관계를 분석하는 방법으로 생산량의 변화에 따라

수익 및 비용이 어떻게 변하는가를 분석하는 것이다.

손익분기를 결정하는 요인은 고정비, 변동비 및 수익이 있으며, 이들의 관계를 그림으로 나타내면 Fig.7과 같다.

손익분기분석은 또한 기본적으로 하나의 제품을 대상으로 한다. 손익분기점은 이익이 영이 되는 생산량 혹은 총수익이 총비용과 같게 되는 생산량으로 정의한다.

손익분기의 경제적 평가요인들을 구하는 절차는 다음과 같다.

$$(1) TC = FC + VC \times Q$$

$$(2) TI = R \times Q$$

$$(3) P = TR - TC = R \times Q - (FC + VC \times Q)$$

$$(4) Q_{BEF} = FC / R - VC$$

여기서 FC : 고정비, Q : 생산량, VC : 변동비/단위당, TC : 총비용, TI : 총수익,  $Q_{BEF}$  : 손익분기수량, R : 수익/단위당, P : 이익이다.

그래프 또는 수식에 의한 이 방법은 평가의 개념을 쉽게 이해할 수 있고, 여러가지 대안에서 최적의 대안을 나타내주므로 재료의 수급 및 재고관리 등에 적용할 수 있다.

부품이나 제품을 경쟁가격으로 제조하려면 재료와 공정을 가능한 한 효율적으로 사용하여야 한다. 가장 이상적인 방안으로는 가장 저렴한 재료를 사용하고 부품의 만족스러운 성능에 필요로 하지 않는 특성에는 경비를 지출하지 않으면 된다. 그러나 재료의 효율적 이용은 현실적으로는

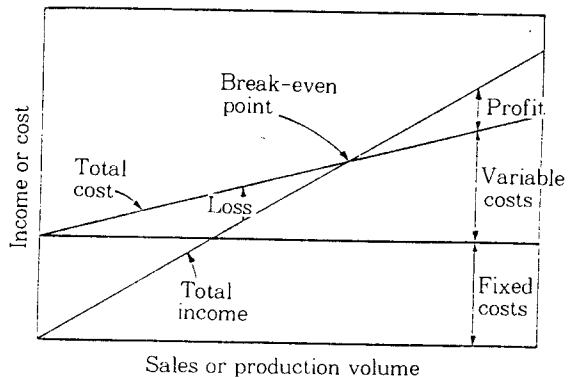


Fig.7 simple break-even chart

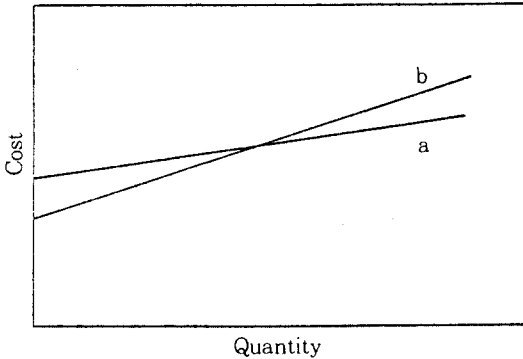


Fig.8 Application of break-even analysis to the selection of economic stock size

간단한 문제가 아니며, 특히 부품이나 제품의 성공적인 제조를 위해서는 적절한 재고량의 유지가 필수적인 요소가 된다. 적시적량의 재고로 고객에 대한 서비스 수준을 최대화 하며, 이에 부수되는 제비용을 최소화 하는 것은 서로 상충되는 문제이기 때문에 손익분석법을 이용하여 재고량은 어느 수준이 적정한가? 재고를 보충할 때 1회주문량은 얼마로 해야 하는가? 보충을 위한 주문은 언제 해야 하는가? 등에 대한 가장 좋은 결정을 내림으로써 이러한 문제를 해결하여야 한다.

재료 이용과 관련하여 비용을 고려한 적절한 재고량의 유지를 위한 손익분기분석의 예를 제시하면 Fig.8와 같다.

#### 4. 결 론

수송체계의 설계 해석은 구조물을 이루고 있는 부품 재료의 특성에서부터 구조부품들간의 상호연결성에 의한 구조물의 신뢰도와 운행에 다른 주위 환경요소들에 이르기까지 고려해야 할 요소가 대단히 많으며 이들 요소들은 설계의 각 단계

에서 상호 연관적으로 작용한다. 특히 설계과정에서 재료는 여러분야와 관련되며 결국 제품의 경제성을 좌우하는 중요한 요소가 된다.

따라서 구조물의 설계시 최소의 비용으로 최대의 기능적 요건을 충족시키는 경제적이며 효율적인 설계가 되기 위해서는 재료의 선정 및 이용에서 현실적이 코스트 테이블(Cost table)을 토대로 객관, 타당성있는 가치판단 기준에 입각한 경제분석이 필요하다는 것을 알 수 있다.

#### 참 고 문 헌

1. Mahmoud M. Farag, "Selection of materials and manufacturing process for engineering design", Prentice-Hall, pp. 361-416, 1989
2. 한국기계연구원, "신소재 경량차체 구조물의 최적설계기술개발", 1993
3. Selwood, P., Wolton, S. and Stoddart, T., "Advanced materials in racing cars, metal and materials", Vol.3, No 2, pp. 655-658, 1990
4. 송윤섭, "자동차 설계와 공기역학 특성에 관한 연구", 채문연구소, 1994
5. James P. Schaffer, "The science and design of engineering materials", Irwin, pp. 748-791, 1995
6. L. D. Miles, "Techniques of value analysis and engineering", Mcgraw-hill, pp. 2-25, 1972
7. Crane, F. "A, Selection and use of engineering materials", Butterworths, 1984
8. Benjamin S. Blanchard, "Systems engineering and analysis", Prentice-Hall, pp.236-322, 1981