

철구조물의 설계방법에 대한 비교 연구

김동권* · 최재승* · 황석환*

Comparative Study of Design Methods for Manufacturing of Steel Structure

Dong-Kwon Kim, Jae-Seung Choi and Suk-Hwan Hwang

Key Words : Steel Structure(철구조물), Allowable Stress Design(허용응력설계), Load and Resistance Factor Design(하중저항계수설계), Load Factor(하중계수), Resistance Factor(저항계수)

Abstract

Allowable stress design(ASD) method has been widely used to design steel structures such as boiler and heat recovery steam generator(HRSG) of power plant. However, many researchers are recently intrested in road and resistance factor design(LRFD) method which may take the place of ASD. In this work, the weight calculation of steel structure was compared when ASD and LRFD were applied respectively. For the calculation of weight of steel structure, computer program was developed and applied to obtain beam weight. Using this program and GTSTRUDL, structural design program, weight of steel structure is calculated. As a result of weight calculation, maximum 5.4% of weight reduction is achieved among examples of this study by applying LRFD comparing with the result of ASD, and those results quite dependent on the applied load and member classification.

1. 서론

현재 화력발전소용 보일러와 복합화력발전소용 배열회수보일러(HRSG)등을 지지하는 철구조물을 설계할 경우에는 허용응력설계법(ASD, Allowable Stress Design)을 주로 사용하고 있다. 그러나, 최근에 국내외적으로 향후에 이 허용응력설계법을 대체할 가능성이 큰 하중저항계수설계법(LRFD, Load and Resistance Factor Design)에 관한 관심이 증대하고 있다.

외국의 경우에는 화력발전소에 공급되는 보일러 철구조물에 대하여 하중저항계수설계법을 사용하여 기본설계를 진행하고 있다고 알려져 있지만, 국내에서는 아직까지 대형의 발전소 보일러를 지지하는 철구조물에 대하여 하중저항계수설계법을 적용한 사례는 없다. 그렇지만 이 하중저항계수설계법은 개념적으로 허용응력설계법보다는 보다 합리적인 설계방법으로 알려져 있기 때문에 머지않은 장래에 하중저항계수설계법을 적용한 대형 철구조물을 접할 수 있게 될 것이다.

이러한 환경을 고려해 볼 때 국내에서도 하중저항계수설계법에 대한 보다 많은 관심이 필요할 시점이라고 하겠다.

본 논문에서는 하중저항계수설계법을 실제적으로 적용하게 되면 철구조물의 중량면에서는 어떤 정도의 효과를 가져올 수 있는 지에 대해서 중점적으로 검토하였다. 본 논문을 통하여 철구조물의 설계에 관심을 가지고 있는 많은 사람들에게 설계방법의 변경에 따른 중량 변화에 대한 궁금증을 다소나마 해소할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 철구조물 설계의 방법

2.1 허용응력설계법

허용응력설계법에서는 구조부재의 유용성에 대한 한계를 철구조물의 하중이 탄성해석에 의해서 구해질 때 허용응력(Allowable Stress)의 범위를 넘지 않는다고 본다. 이러한 구조부재의 유용성에 대한 한계의 예는 항복응력(Yield Stress), 좌굴응력(Critical Buckling Stress), 인장응력(Tensile Stress), 응력한계(Stress Range)와 같은 것이고 이것은 허용응력과는 안전계수에 의해서 연관된다.

* 한국중공업 기술연구원

예를 들어 인장에서의 허용응력은 0.6Fy(항복의 한계상태)와 0.5Fu(파괴에 대한 한계상태) 중 적은값이 된다.

2.2 소성설계법

소성설계법에서는 구조부재의 유용성에 대한 한계를 소성기구가 형성될 때의 하중으로 잡고 이 하중이 계수를 곱한 작용하중과 비교된다고 본다. 여기서, 하중계수(Load Factor)는 중력하중시에는 1.7, 중력하중과 풍하중 등과의 복합시에는 1.3이다.

2.3 하중저항계수설계법

하중저항계수설계법은 신뢰성 이론에 근거한 것으로 허용응력설계법과 소성설계법에 확률론적인 방법을 포함시켰다. 따라서, 하중저항계수설계법은 강도와 안정에 관한 한계상태를 반영한다[1].

부재가 받게 되는 하중(건축설계기준)과 부재가 가지고 있는 저항(설계시방)의 정량화는 연구를 통해서 수집된 자료의 확률적 평가에 기초한 어떤 규정된 값으로 결정론적으로 결정되게 된다.

2.3.1 하중의 불확실성

ANS(American National Standard)에서 개발한 “건축물과 기타 구조물의 최소 설계하중 ANSI A58.1”은 관측을 통해서 만들어졌으며 그 하중치가 초과될 수 있는 가능성이 있다.

2.3.2 저항의 불확실성

예를 들어, Fig. 1 과 같이 ASTM A36 강은 규정된 최소 항복강도는 36 ksi 이지만 어떤 부재가 규정 항복강도보다 낮은 강도를 가질 수 있는 가능성이 있다.

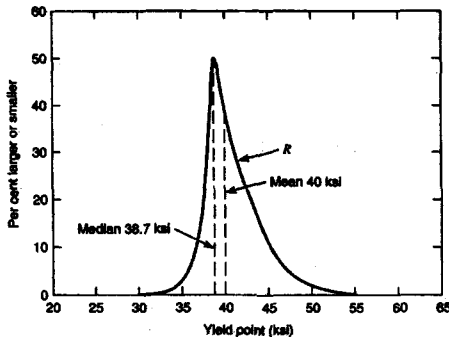


Fig. 1 Distribution of yield strength through mill test of carbon steel(A36)

2.3.3 확률적 분포와 신뢰성 지수

하중과 저항의 분포를 불규칙 변수로 기술할 때 그들의 확률적 분포(Fig. 2)는 어떤 파괴확률(Fig. 3)을 가지고 있다. Fig. 3에서는 R/Q 비를 자연 대수로 나타내고 있으며 이것을 이용해서 재료의 거동뿐만 아니라 설계, 시공까지 기술하는 통계적 특성(평균치와 편차계수)으로부터 직접 신뢰성지

수(β)를 구할 수 있다. 예를 들면, 보에 대한 신뢰성 지수는 3 이고 접합부는 4.5 이다. 또한, 풍하중과 지진하중에 대해서는 낮은 신뢰성지수를 사용하는데 이것은 대지진이나 강한 풍하중의 지속시간이 짧고 자주 발생하지 않기 때문이다.

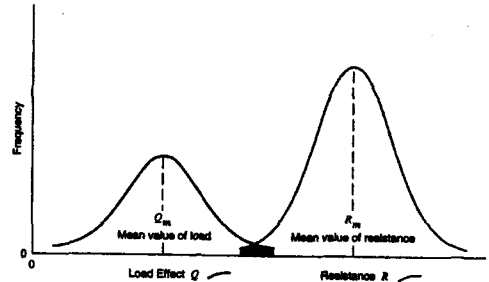


Fig. 2 Frequency distribution of Load Effect(Q) and Resistance(R)

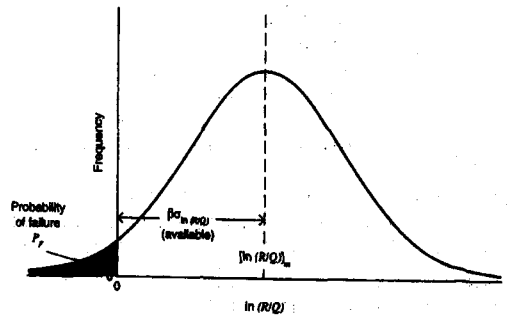


Fig. 3 Definition of safety index

2.3.4 설계기준

아래의 식과 같이 계수화된 하중조합보다 계수화된 저항의 조합이 커야 한다.

$$\sum \gamma_i Q_i \leq \phi R_n \quad \dots\dots\dots(1)$$

여기서, Q: 공칭 하중효과

Rn: 공칭 저항

γ : 하중 Q의 종류에 따라 결정되는 불확실성의 정도에 해당되는 여러가지 하중계수

ϕ : 저항뿐만 아니라 Rn을 만들기 위한 설계단계에서의 불확실성에 해당하는 여러가지 저항계수

2.3.5 하중조합

LRFD의 각 하중조합은 1차 하중(밀줄 친 하중)과 2차 하중 사이의 관계를 보여준다. 부재나 접합부의 설계시 가장 불리한 하중조합을 항상 채택해야 한다.

1.4 D

$$1.2D + 1.6L + 0.5(Lr \text{이나 } S \text{ 또는 } R)$$

$$1.2D + 1.6(Lr \text{이나 } S \text{ 또는 } R) + (0.5L \text{ 또는 } 0.8W)$$

$$1.2D + 1.3W + 0.5L + 0.5(Lr \text{이나 } S \text{ 또는 } R)$$

$$1.2D + 1.0E + 0.5L + 0.2S)$$

0.9 D ± (1.3 W 또는 1.0 E)

- 여기서, D: 구조물 자체의 무게나 영구 부착물에 의한 고정하중
 L: 거주자나 이동 가능한 장비에 의한 적재하중
 Lr: 지붕에 작용하는 적재하중
 W: 풍하중
 S: 설하중
 E: 지진하중
 R: 강우나 얼음에 의한 하중(물이 고이는 것에 의한 영향 제외)

3. 철구조물 설계의 절차

허용응력설계법에 의한 일반적인 철구조물의 설계절차는 Fig. 4와 같다. 전체적으로 보면 크게 기본설계부분과 상세설계부분으로 나눌수 있다.

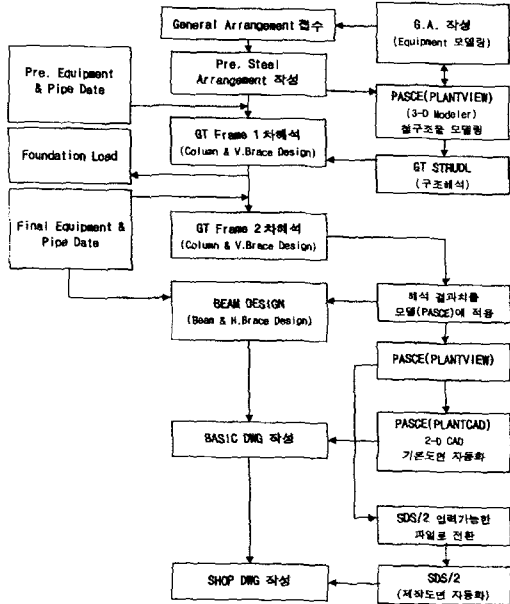


Fig. 4 Design procedure of steel structure

먼저 General Arrangement를 작성하여 Preliminary Arrangement를 작성한 후 Frame 해석을 수행한다. 이 Frame 해석에서는 철구조물의 주요 부분인 Colum, Vertical Brace 등에 관한 치수가 선정된다. 이 후 철구조물의 기초공사가 진행됨에 따라 각 층의 Beam과 Horizontal Brace에 대한 치수는 보다 정확한 Load를 사용하여 선정하게 된다. 이러한 절차를 기본설계로 볼 수 있고, 상세설계에서는 상기의 기본설계로부터 결정된 치수와 각 부재의 연결부에 들어가는 볼트, 용접부 등의 체결부위의 설계등을 수행하여 현장에서 바로 제작에 들어갈 수 있도록 제작도를 작성하게 된다.

4. 부재선정 프로그램 개발

위에서 설명한 것처럼 대형 철구조물을 제작할 때에는 공사기간이 상당히 길게 소요되기 때문에 철구조물의 기초공사를 빨리 수행하기 위해서 철구조물의 Column과 Vertical Brace에 대한 치수를 먼저 결정한 후, 각 층의 Beam과 Horizontal Brace는 공사가 진행됨에 따라서 아래 층부터 정확한 하중을 이용하여 치수를 결정해 나가게 된다. 이 때 필요한 것이 Beam Design 프로그램인데, 본 연구에서는 이 때 소요되는 Beam Design 프로그램을 확장하여 단일부재가 인장만을 받을 경우, 압축만을 받을 경우, 굽힘만을 받을 경우, 인장과 굽힘을 동시에 받을 경우, 압축과 굽힘을 동시에 받을 경우와 같이 총 5가지 경우에 부재를 선정할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

본 프로그램은 AISC(American Institute of Steel Construction)의 기준을 사용하여 허용응력설계법과 하중저항계수설계법 2가지에 대하여 작성하여 두 가지 설계방법에 대한 부재선정결과를 손쉽게 파악할 수 있도록 하였다[2,3].

5. 인장부재에 대한 비교

두 가지의 AISC 방법에 의하여 설계된 인장부재에 대하여 얻어진 안전율의 비교는 예상되는 일반적인 결과를 나타낸다[4]. 다른 TYPE 부재의 설계에 있어서는 공칭강도 Rn이 두 방법에서 반드시 같다고 할 수 없기 때문에 직접적인 비교는 더욱 어렵다.

Gravity Load와 Live Load를 받고 있는 인장부재에 대하여 저항계수 φ = 0.9 이고, 허용응력설계법에 있어서 축방향 인장을 받고 있는 부재의 안전율 F.S. = 1.67 이므로

$$D+L = \frac{Rn}{1.67}$$

$$1.67 + 1.67 L = Rn \quad (ASD)$$

하중저항계수설계법에 따르면

$$1.2 D + 1.6 L = 0.90 Rn$$

$$1.33 D + 1.78 L = Rn \quad (LRFD-1)$$

$$1.4 D = 0.90 Rn$$

$$1.56 D = Rn \quad (LRFD-2)$$

따라서,

$$\frac{LRFD}{ASD} = \frac{1.33 D + 1.78 L}{1.67 D + 1.67 L} = \frac{0.8 + 1.07 (L/D)}{1 + (L/D)}$$

$$\frac{LRFD}{ASD} = \frac{1.56 D}{1.67 D + 1.67 L} = \frac{0.93}{1 + (L/D)}$$

이 결과를 그림으로 나타내면 다음과 같다. Fig. 5를 보면 인장부재의 설계는 Live Load와 Dead

Load의 비(L/D)가 3일 때 LRFD와 ASD는 거의 같다. 또한, L/D 값이 낮아지면(Dead Load가 지배적) LRFD를 사용하는 것이 유리하고 L/D 값이 3보다 커지면 3% 이내로 경제적인 설계가 된다.

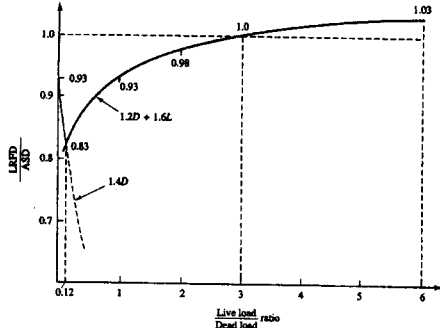


Fig. 5 Comparison of ASD and LRFD for tension member

상기의 이론적인 결과를 참조하여 세가지의 Wide Flange 부재(W7X14, W16X190, W35X191)에 대하여 Live Load와 Dead Load의 비가 0에서 6까지 0.5 간격으로 해석을 수행하였는데 그 결과는 아래와 같다.

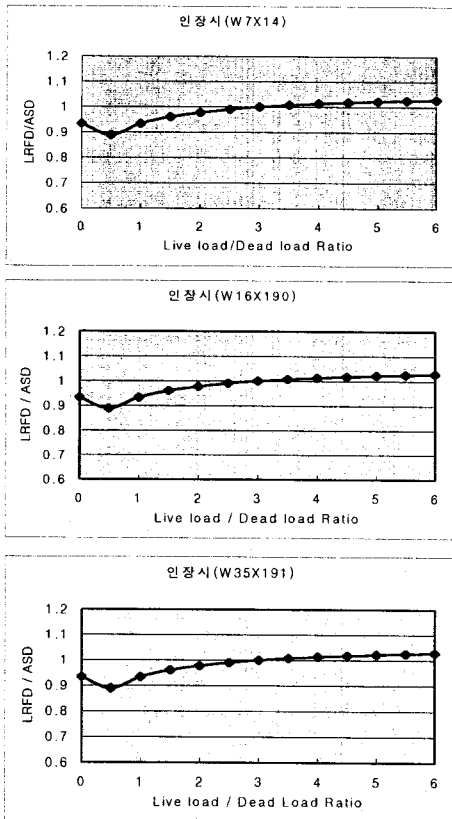


Fig. 6 Results of analysis for tension member

6. 다수부재에 대한 비교

6.1 2차원 철구조물

철구조물 설계용 소프트웨어인 GTSTRUDL을 이용하여 허용응력설계법과 하중저항계수설계법의 차이점에 대해 예제를 통해 설명하기로 한다. GTSTRUDL에서 사용하는 하중조건에는 독립(Independent)하중조건과 종속(Dependent)하중조건이 있다. 독립하중조건에는 Dead Load, Live Load, Wind Load, Seismic Load 등이 있으며, 종속하중조건은 이들 독립하중조건들의 조합으로 표현된다. ASD와 LRFD의 독립하중조건의 적용은 동일하며, 종속하중조건의 적용에 있어서 차이점을 나타낸다.

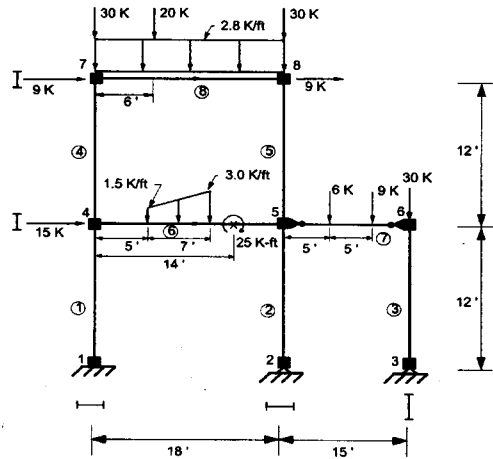


Fig. 7 An example of 2-D steel structure

먼저 2차원 철구조물의 예제를 Fig. 7에 나타내었으며, 전체 부재의 수는 8개이고, Column이 5개, Beam이 3개이다. 독립하중조건으로 Dead Load, Live Load, Wind Load가 사용되었다.

위의 예제에 대하여 두 가지 설계 방법으로 해석한 결과를 Table 1에 나타내었으며, ASD보다 LRFD의 철구조물의 중량이 4% 작은 것으로 나타났다.

Table 1 Analytical result of 2-D steel structure

구분	부재 No.	ASD	LRFD	
선정된 부재의 종류	COLUMN	1	W12X53	W14X48
		2	W14X43	W12X40
		3	W12X40	W12X40
		4	W12X53	W14X48
		5	W14X43	W12X40
철구조물의 중량	BEAM	6	W21X44	W21X44
		7	W12X22	W12X22
		8	W21X44	W21X44
		2.354TON	2.26 TON	

6.2 3차원 철구조물

3차원 철구조물의 예제를 Fig. 8에 나타내었으며, 전체 부재의 수는 114개 이고, Column이 42개, Beam이 58개, Brace가 14개이다.

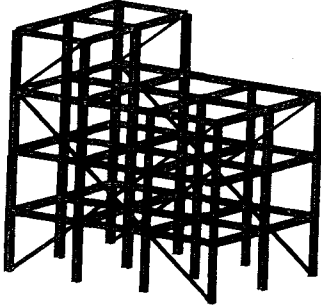


Fig. 8 First example of 3-D steel structure

그리고, 하중조건으로 Dead Load, Live Load, Wind Load가 사용되었다. 3차원 철구조물의 경우 부재의 수가 많아서 2차원 철구조물에 비하여 하중조합식도 많고, 해석결과의 선택된 부재의 Type을 나열하기도 곤란하므로 철구조물의 중량만 Table 2에 나타내었다. 3차원 철구조물의 예제에서도 역시 ASD보다 LRFD의 철구조물의 중량이 5.4% 작은 것으로 나타났다.

Table 2 Analytical result of 3-D steel structure

구분	ASD	LRFD	LRFD/ASD 의 비
철구조물 의 중량	50.014 TON	47.337 TON	0.946

6.3 실제의 철구조물

실제의 철구조물 형상을 Fig. 9에 나타내었다. 이 철구조물은 최고 COLUMN 높이 27.6 m의 2절주로 구성되고, X방향과 Y방향으로 각각 26 m와 52.5 m의 대형 철구조물로서 In Door Type의 형식을 갖추고 있다.

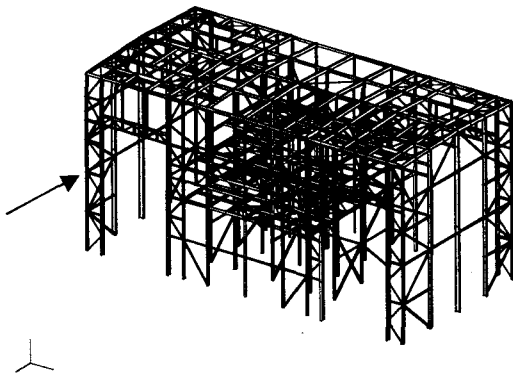


Fig. 9 Second example of 3-D steel structure

6.3.1 COLUMN과 BRACE의 중량비교

COLUMN과 BRACE의 중량 산출은 GTSTRU DL을 이용하여 계산한다. BRACE는 VERTICAL BRACE와 HORIZONTAL BRACE로 구분되는데, POST와 연결되어 있는 VERTICAL BRACE는 COLUMN과 연결되어 있는 VERTICAL BRACE와 비교할 때 상대적으로 부재의 크기도 작고 개수도 적으므로 중량 산출에서 제외시켰으며, COLUMN과 HORIZONTAL BRACE는 모두 포함시켰다. 실제 철구조물의 GTSTRU DL 해석 결과를 Table 3에 정리하였다. 여기서 전체 철구조물의 중량에는 POST와 연결되어 있는 VERTICAL BRACE와 BEAM의 중량까지도 포함한 전체 철구조물의 중량을 말한다.

GTSTRU DL을 이용하여 COLUMN과 VERTICAL BRACE의 중량을 계산한 결과 ASD를 적용할 경우에는 132.22 TON, LRFD를 적용할 경우에는 135.0 TON으로 LRFD를 적용할 경우가 중량이 약 2% 증가하였다.

Table 3 Analytical result by GTSTRU DL

구분	ASD	LRFD	LRFD/ASD 의 비
① COLUMN의 중량	89.78 TON	93.42 TON	1.04
② VERTICAL BRACE의 중량	42.44 TON	41.58 TON	0.98
③ HORIZONTAL BRACE의 중량	11.29 TON	11.55 TON	1.02
① + ② + ③의 중량	143.51 TON	146.55 TON	1.02
전체 철구조물 의 중량	200.01 TON	207.67 TON	1.04

6.3.2 BEAM의 중량비교

BEAM의 중량 산출을 위하여 실제 철구조물의 단일 PLANE(EL.12000, Fig. 13의 화살표)을 대상으로 하여 해석을 수행하였다. 이 단일 PLANE에 대한 BEAM은 68개 있으나, 이들 중 19개의 BEAM은 다른 BEAM이나 HORIZONTAL BRACE에 의해 두 개의 MEMBER로 나뉘어져 있으므로 전체 MEMBER의 개수는 87개이다.

(1) ASD에 의한 중량 산출

EL.12000 PLANE에 대한 BEAM DESIGN을 위하여 우선 전체 철구조물을 대상으로 하여 GTSTRU DL의 ASD Code를 이용하여 해석을 수행함으로써 이 PLANE의 각 BEAM에 작용하는 축력을 구하였다. 이 때의 축력은 조합하중을 받을 때의 값을 구하였다.

또한, 각 BEAM에 작용하는 굽힘하중(VERTICAL FORCE)은 실제로 각 BEAM에 작용

하게 되는 하중을 적용하였다.

위에서 계산된 축력과 굽힘하중으로부터 각 BEAM 이 굽힘하중만 작용할 때, 굽힘하중과 인장하중이 동시에 작용할 때 그리고 굽힘하중과 압축하중이 동시에 작용할 때의 3 가지의 경우에 대하여 BEAM DESIGN PGM 을 수행하여, 이러한 3 가지의 경우를 동시에 만족하는 BEAM 중 최적인 BEAM SIZE 와 중량 그리고 STRESS RATIO 등을 계산하였다.

단, 부재의 선정시에 사용되는 BEAM 의 종류는 NOMINAL DEPTH 가 7 inch 부터 173 inch 까지 인 101 가지의 WIDE FLANGE BEAM(최소 W7X14, 최대 W173X2243)중에서 선정되도록 하였다.

(2) LRFD 에 의한 중량 산출

LRFD 에 의한 BEAM 의 중량을 구하기 위하여 전체 철구조물을 대상으로 하여 GTSTRU DL 의 LRFD Code 에 따른 해석 방법을 이용하여 동일한 PLANE 의 각 BEAM 에 작용하는 축력을 구하였다. 이 경우에도 LRFD Code 에 의한 조합하중을 입력 값으로 했을 경우의 각 BEAM 에 작용하는 축력을 구하였다.

굽힘하중도 LRFD 의 경우에는 계수화된 하중이 필요하므로 각 BEAM 에 실제로 작용되는 하중을 계수화하여 사용하였다. 이 때 적용된 계수 값은 DEAD LOAD 인 경우에는 1.4, 그리고 WIND LOAD 인 경우에는 1.3 을 적용하였다.

(3) ASD 와 LRFD 에 의한 중량 비교

위의 해석 결과로부터 구해진 EL.12000 PLANE 에 대한 중량을 정리하여 Table 4 에 나타내었다.

Table 4 Analytical result of plane at EL. 12000

구분	ASD	LRFD	LRFD/ASD 의 비
BEAM 의 중량	23.573 TON	21.182 TON	0.9

6.3.3 전체 중량비교

실제 철구조물 전체의 중량 비교는 다음과 같다. 먼저 GTSTRU DL 을 이용해서 구한 COLUMN, VERTICAL BRACE, HORIZONTAL BRACE 의 중량에 BEAM DESIGN PGM 을 이용해서 구한 BEAM 의 중량을 합해서 전체 중량을 구한다. 여기서 HORIZONTAL BRACE 의 중량 계산은 다른 부재들에 비해서 중량이 적기 때문에 전체 중량의 ASD 와 LRFD 의 비교에서는 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단하여 GTSTRU DL 해석 결과를 그대로 사용하기로 한다.

그리고 BEAM 의 중량은 EL.12000 PLANE 에서 계산한 결과를 사용하고 나머지 BEAM 의 경우도 같은 비율을 적용하여 전체 BEAM 의 중량을 계

산한다. 즉 ASD 를 기준으로 할 때 Table 3 에서 전체 BEAM 의 중량은 $200.01 - 143.51 = 56.5$ TON 이 된다. 물론 이 56.5 TON 에는 POST 와 연결되어 있는 VERTICAL BRACE 의 중량도 포함되어 있으나 그 양이 적기 때문에 무시하였다. 56.5 TON 에 Table 4 의 결과를 적용하면 LRFD 의 전체 BEAM 의 중량은 $56.5 \times 0.9 = 50.85$ TON 이 된다.

실제 철구조물 전체의 중량은 ASD 의 경우 $143.51 + 56.5 = 200.01$ TON 이고, LRFD 의 경우 $146.55 + 50.85 = 197.4$ TON 이 된다. LRFD/ASD 의 비는 0.987 로써 LRFD 를 적용할 경우가 중량이 약 1.3% 감소하였다. 이를 정리하여 Table 5 에 나타내었다.

Table 5 Comparison of total weight for Second example of 3-D steel structure

구분	ASD	LRFD	LRFD/ASD 의 비
COLUMN 의 중량	89.78 TON	93.42 TON	1.04
VERTICAL BRACE 의 중량	42.44 TON	41.58 TON	0.98
HORIZONTAL BRACE 의 중량	11.29 TON	11.55 TON	1.02
BEAM 의 중량	56.5 TON	50.85 TON	0.9
전체 철구조물의 중량	200.01 TON	197.4 TON	0.987

7. 결론

본 논문에서는 철구조물의 설계방법에 따른 중량의 비교를 수행하기 위하여 부재선정 프로그램을 개발하고 몇가지의 경우에 대하여 GTSTRU DL 을 이용하여 해석을 수행하였다. 그 결과 본 연구에서 수행된 예제의 경우에 있어서는 하중저항계수설계법을 적용할 경우 최대 5.4%까지의 중량 감소가 발생하였으나, 이는 하중의 종류나 부재의 종류 등에 따라 달라지므로 설계방법 변경에 따른 중량감소효과를 일률적으로 정의할 수는 없다.

참고문헌

- [1] 이원호 외 3명 공역, 1997, 강구조-설계를 통한 거동의 관리, 범한서적
- [2] Manual of Steel Construction : Allowable Stress Design, Ninth Edition, 1989, American Institute of Steel Construction, Inc.
- [3] Manual of Steel Construction : Load & Resistance Factor Design, Second, 1993, American Institute of Steel Construction, Inc.
- [4] Charles G. Salmon and John E. Johnson, 1996, Steel Structures : Design and Behavior, Fourth Edition, Harper Collins