技術報告

鐵骨造 學校 構造設計 事例 分析

A Case Study of Structural Design of Steel-Framed School

柳 承 一*
Rieu, Seung-Il

1. 개요

1999년 발표된 포항산업과학연구원의 "철골조 학교 거주성평가 및 개선방안 연구"에 따르면 철골조로 시공된 학교시설은 철근콘크리트조로 시공할 경우보다 약 10%정도 공사비가 더 소요되는 것으로 나타났다.

보고서에서는 경제적인 대안으로 최신의 강구조 설계법인 "강구조 한계상태 설계법"을 적용한 구조설계를 추천하고 있다.

강구조 한계상태 설계법은 기존의 허용응력 설계법보다 발전된 최신의 강구조 설계 방법이다. 이 설계법에는 한계상태, 다중의 하중계수와 저항계수, 신뢰성에 대한 절대적 확률론적 결정을 명확히 고려하고 있다. 이러한 계수화 형식은 허용응력 설계법에서 저항(항복응력)을 안전계수로 나누기만 했던 것과는 다른 것이며, 소성설계법에서 하중에 일반하중계수를 곱하는 것과도 다른 것이다. 한계상태 설계법은 설계자에서 더 많은 융통성, 합리성, 가능성 및 가능한 전반적인 경제성을 부여하기 위하여 개발된 설계법이다.

철근콘크리트구조의 설계방법이 과거에는 허용응력 설계법(WSD, Working Stress Design)이 적용되었으나, 현재는 거의 모든 구조설계가 극한강도 설계법(USD, Ultimate Strength Design)으로 수행되고 있다. 이것은 극한강도 설계법이 허용응력 설계법에 비하여 합리적이고 설계자의 의도를 융통성있게 반영시킬 수 있는 설계법이란 것을 증명하고 있다.

한계상태 설계법은 철골의 장점을 극대화하려는 설계방안으로서 유럽 및 미국 등에서는 이미 실무 구조설계에서 널리 적용되고 있으며, 우리나라에서도 이미 1997년에 건설교통부에 의하여 법제화되었으며, 구조설계 실무에 즉시 적용할 수 있다.

그러나, 강구조 한계상태 설계법이 구조설계 실무에 널리 적용되지 못하고 있는 것은 허용응력 설계법에 비해 설계기준의 이해가 어렵고 계산과정이 복잡하며, 계산량이 많기 때문으로 판단된다. 따라서 설계기준에 따른 설계자동화가 필수적이며, 강구조 한계상태 설계법이 내장된 구조해석 및 설계 자동화 프로그램(MIDAS / GENw)이 이미 출시되어 전국 대학의 토목·건축 관련학과에 보급되었다.

여기서는, 허용응력 설계법으로 설계되고 이미 사용중인 학교시설에 대하여 한계상태 설계법을 적용하여 최적화 설계를 수행하였다. 바닥진동 등의 사용성을 검토하여 구조설계에 반영하고, 구조부재의 물량비교에 의한 경제성을 검토하여 경제적인 철골설계법으로서 한계상태 설계법의 적용성을 평가하고자 한다.

2. 예제모델 개요

대상으로 선택한 학교시설은 포항의 지곡 초등학교이다. 일반교실동과 관리 및 특별교실동으로 구분된 지하1층 지상 3층의 두 개의 건물이 노출 철골의 연결통로로 이어져 있다. 지하는 철근콘크리트조 지상은 철골조로 계획된 이 학

*주식회사 포스마이다스 건축구조팀장

교는 1998년 3월에 시공이 완료되어 현재 사용 중이다.

구조해석 및 설계를 위하여 연결통로를 제외한 두 개의 건물을 모델링하고, 설계당시 적용되었던 하중을 동일하게 적용하여 구조해석을 수행하였다.

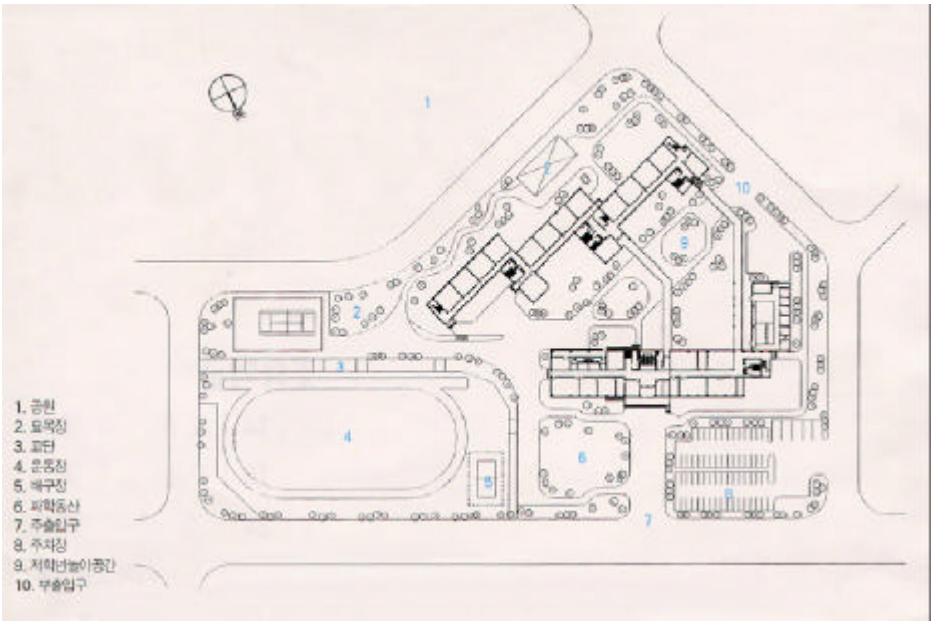


그림1. 포항 지곡초등학교 배치도

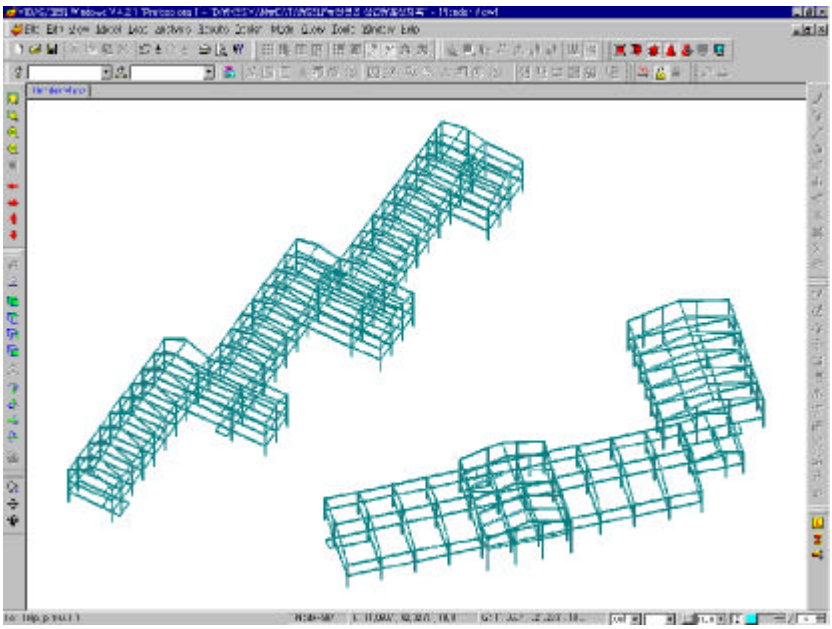


그림2. 전체모델

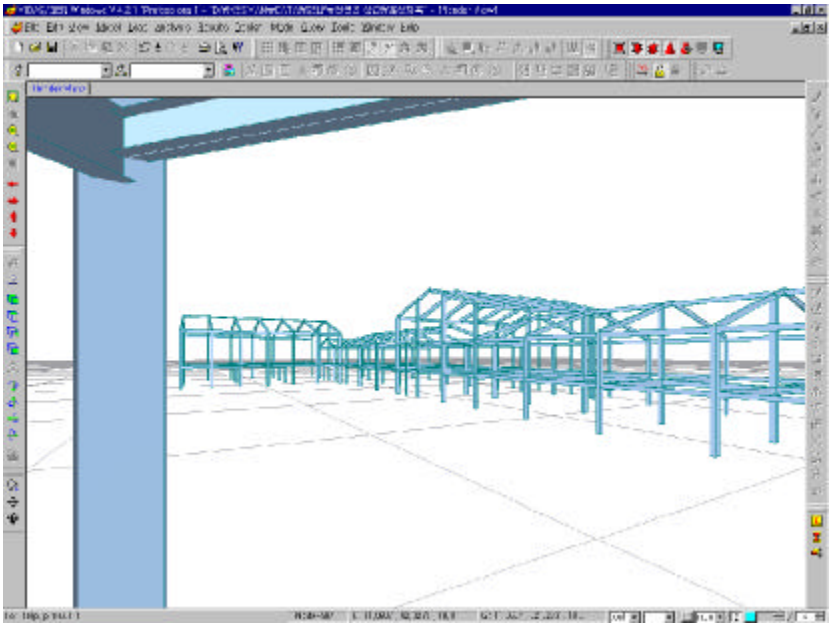


그림3. 모델도

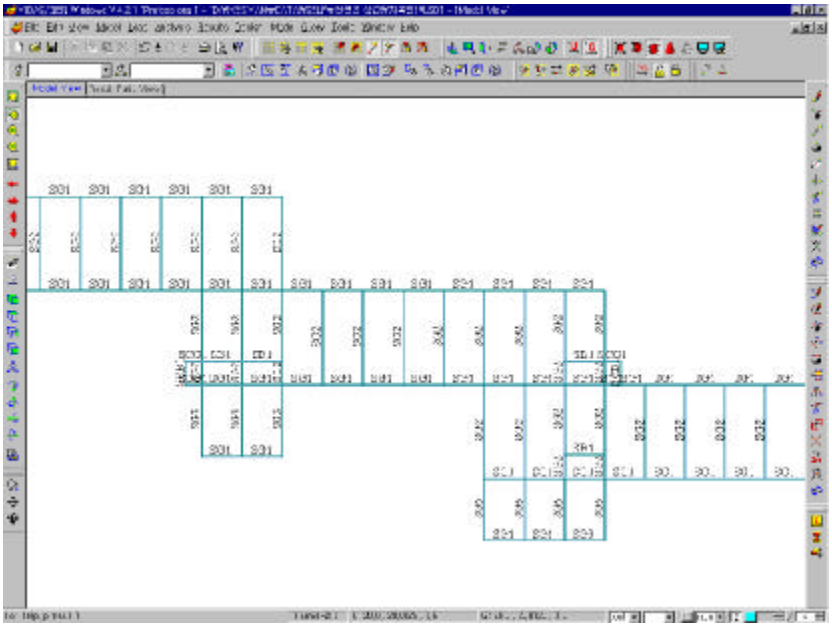


그림4. 일반교실동 구조평면

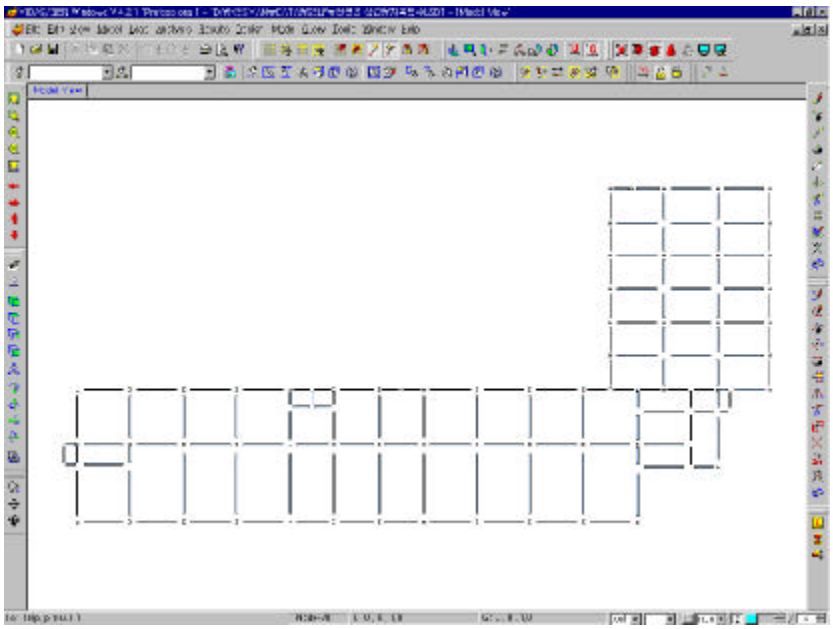


그림5. 특별교실동의 평면형태

일반교실동의 구조평면은 그림 4와 같다.

일반교실동은 학교시설의 전형적인 평면형태인 4.5×10.5 m 모듈로 구성되며, 거푸집을 이용한 콘크리트 슬래브(THK.120)가 타설되었다. 여기에 열린교실로의 전환에 대비한 가변형 내벽 구조 시스템인 스틸 스터드(steel stud)를 적용하여 구조부재의 경량화가 가능하도록 계획되었으며, 층고는 3.6 m 이다.

작은보(beam)는 큰보(girder)에 전단접합(shear connection)되어 지지되며, 슬래브의 중력방향 하중을 골조(frame)로 전달하는 전형적인 철골가구구조(steel frame structure)를 구성하고 있다.

특별교실동은 지상 2층으로 이루어지며, 지상3층에는 부분적으로 도서실이 설치되었다. 2층 부분은 낮은 층수를 고려하여 7.2×7.5,10.5 m로 확대된 모듈이 적용되었고, 3층 부분은 6×7.5,10.5 m 로서 일반교실동과 비교하여 기둥부재의 대형화를 방지하고, 시공편의를 도모하였다.

강당은 7.2×9m 모듈의 골조가 바닥을 지지하며 층고는 6 m 이다.

지붕은 금속기와 중도리(purlin, C-125×50×20/3.2 @900)를 사용한 경량지붕을 사용하여, 시공성을 높이고 외관을 미려하게 하였다. 경량지붕의 사용으로 강당의 21.6 m 무주공간 확보가 가능해졌다.

최근 학교시설이 지역사회의 문화와 교육의 중심으로 부각되면서, 강당이나 체육시설 등이 학교시설의 중요한 부분을 차지하는 추세이며, 이에 따라 학교시설의 구조시스템이 철골구조로 전환되는 것은 적절한 것으로 판단된다.

해석에 적용된 고정하중은 구조부재의 자중과 마감을 고려하여 산정되었으며, 적재하중과 횡하중은 허용응력도 설계결과와의 비교를 위해 "구조물의 구조기준 등에 관한 규칙"을 동일하게 적용하였다.

구조해석에 의해 산출된 부재력에 한계상태 설계법을 적용하여 산정한 주요부재의 단면크기는 표 1과 같다.

경량의 마감재를 장스팬의 보가 지지하는 경사지붕에서는, 발생되는 응력보다 최대 처짐량을 제한하기 과정에서 단면의 치수가 결정되는 경우가 많다. 한계상태 설계법에서는 처짐에 대한

제한값을 두고있지는 않지만, 철골보 설계의 경우 AIJ LSD를 준용하여 양단지지보의 처짐을 스팬의 1/300 이하로, 캔틸레버보의 처짐은 스팬의 1/250 이하가 되도록 제한하였다.

표 1. 일반교실동 주요부재 치수(그림 4 참조)

부 재 명	치 수	재 질
SG1	H 248×124×5/8	SM490A
SG2	H 496×199×9/14	
SG3	H 396×199×7/11	
SG4	H 450×200×9/14	
SG5	H 350×175×7/11	
SG6	H 194×150×6/9	
SG7	H 350×175×7/11	
SB1	H 250×125×6/9	
SCG1 SCB1	H 244×175×7/11	
C1 C3	H 400×200×8/13	
C2	H 340×250×9/14	
C4	H 294×200×8/12	

3. 합성보 설계

특별교실동의 2층 작은보(beam)을 한계상태 설계법에 따라 노출형 완전합성보로 설계한다.

설계조건

l = 7.2 m, 슬래브 폭(B) = 2.5 m

콘크리트 설계기준강도(f_{ck}) = 210 kg/cm^2,

강재 SM490

고정하중(ω_D) = 0.4 tonf/m^2,

적재하중(ω_L) = 0.25 tonf/m^2

소요휨강도 및 전단강도

$\omega_u = B(1.2D + 1.2L)$

$= 2.5 \times (1.2 \times 0.4 + 1.6 \times 0.25) = 2.2$ t/m

$M_u = \frac{\omega_u l^2}{8} = \frac{2.2 \times 7.2^2}{8} = 14.26$ t m

$V_u = \frac{\omega_u l}{2} = \frac{2.2 \times 7.2}{2} = 7.92$ t

부재가정과 슬래브 유효폭 산정

H-300×150×6.5/9 로 가정

(A_s = 46.78 cm^2, h = 30.0 cm, I_s = 7210 cm^4, Z_p = 542 cm^3)

$b_e = 2 \times \frac{l}{8} = 180$ cm

$B = 250$ cm

$\therefore b_e = 180$ cm

쉬어커넥테의 설계

· 수평전단력

$V_s = A_s F_y = 46.78 \times 3.3 = 154$ t

$V_s = 0.85 f_{ck} b_e t_c = 0.85 \times 0.21 \times 180 \times 12 = 385$ t

완전합성보로 설계하여 $V_s = 154$ t 적용

· ϕ22 스터드의 공칭강도

$V_{sn} = 0.5 R_q A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq A_{sc} F_u$

$A_{sc} F_u = 3.80 \times 4.1 = 15.58$ t

$E_c = 15\sqrt{1000 f_{ck}} = 15\sqrt{210} = 217$ t/cm^2

$V_{sn} = 0.5 R_q A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} = 0.5 \times 1.0 \times 3.80 \sqrt{0.21 \times 217}$

$= 12.83$ t < 15.58

$\therefore V_{sn} = 12.83$ t

· 스터드 소요개수 및 간격

$n = \frac{V_s}{V_{sn}} = \frac{154}{12.83} = 12$ 개

$s = \frac{l/2}{n} = \frac{360}{12} = 30$ cm $\therefore \phi 22@300$ (H_s = 110 mm)

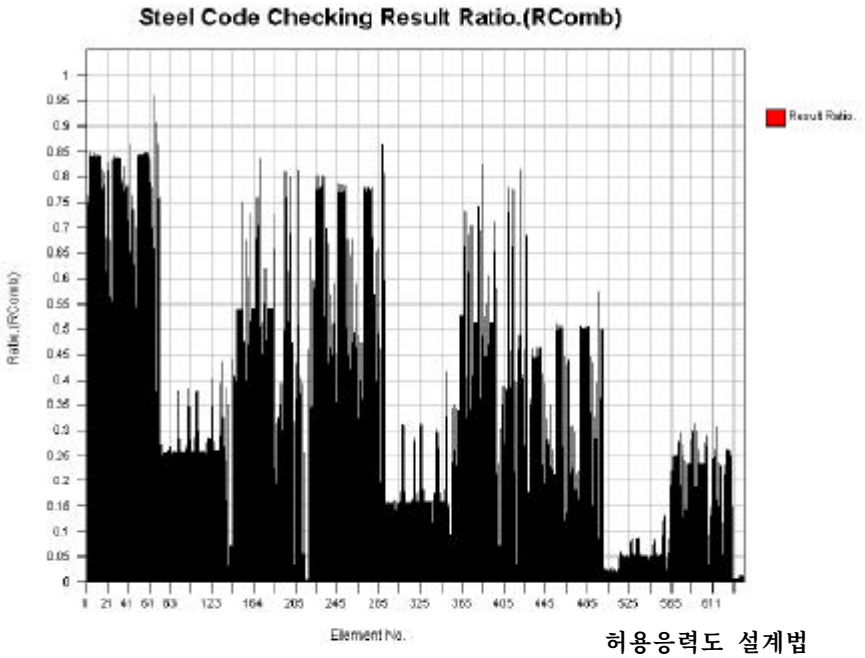
정모멘트에 대한 설계휨강도 검토

· 웨브의 판폭두께비

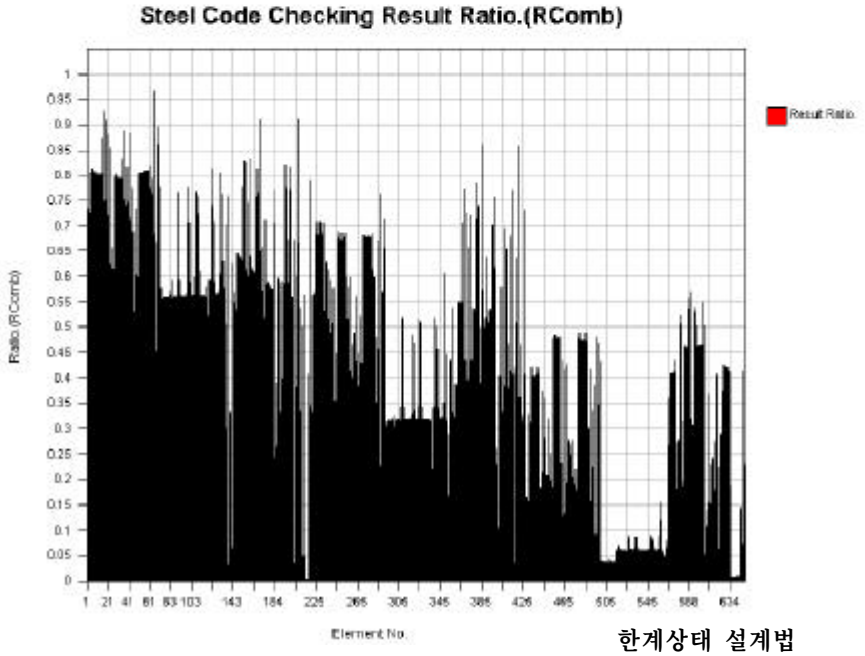
$h/t_w = 30.0/0.65 = 46.2$

$170/\sqrt{F_{yf}} = 170/\sqrt{3.3} = 93.6 > 46.2$

$\therefore h/t_w \leq 170/\sqrt{F_{yf}}$ 인 경우 적용

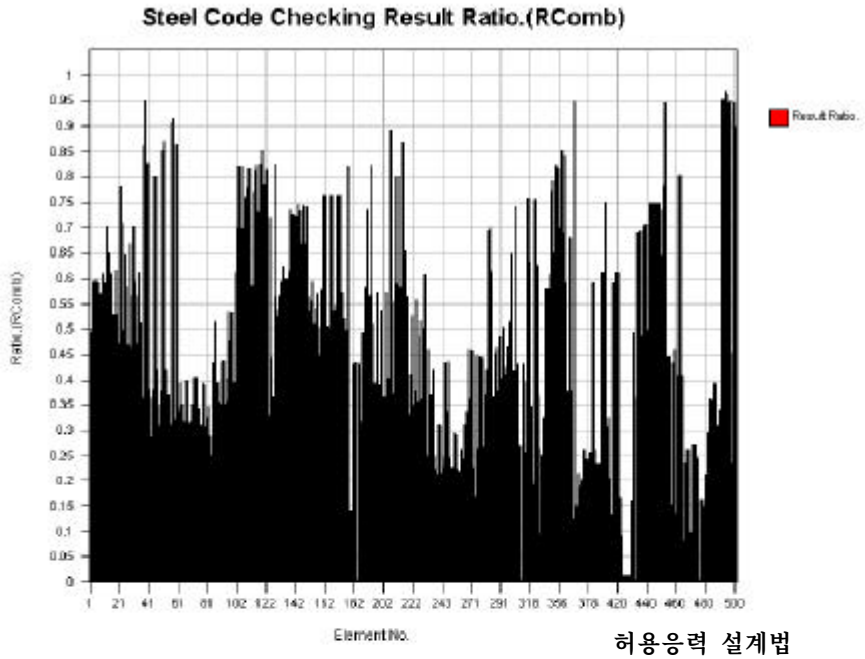


허용응력도 설계법

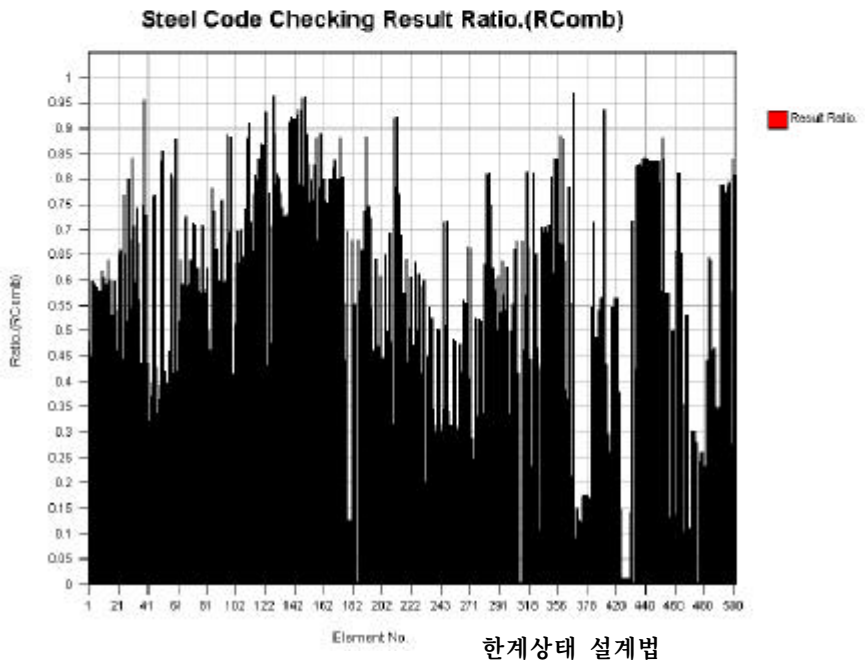


한계상태 설계법

그림6. 일반교실동 설계결과



허용응력 설계법



한계상태 설계법

그림7. 특수교실동 설계결과

· 슬래브의 유효압축력

$C_e = A_s F_y = 154$ t

$0.85 f_{ck} b_e t_c = 385$ t

$\sum V_{sn} = 12.83 \times 360/30 = 154$ t

$\therefore C_e = 154$ t

· 소성 중립축의 위치 판단

$P_{yw} = (d - 2t_f) t_w F_{yw}$

$= (30.0 - 2\times0.9)\times0.65\times3.3$

$= 60.5$ t

$P_y = A_s F_y = 154$ t

$\therefore C_e = P_y$ 인 경우에 포함

(소성중립축이 슬래브내에 있는 경우)

· 설계휨강도

$$M_n = \left(0.5d + h_r + t_c - \frac{0.5P_y}{0.85 f_{ck} b_e}\right) P_y$$

$$= \left(0.5\times30.0 + 12 - \frac{0.5\times154}{0.85\times0.21\times180}\right)\times154$$

$= 3789$ t cm

$\phi_b M_n = 0.85\times37.9 = 32.2$ t m $> M_u (= 14.26$ t m) OK

설계전단강도 검토

$50\sqrt{k_s/F_{yw}} = 50\sqrt{5/3.3} = 61.5 > h/t_w (= 46.2)$

$\therefore V_n = 0.6 F_{yw} A_w$

$= 0.6\times3.3\times30.0\times0.65 = 38.6$ t

$\phi_v V_n = 0.9\times38.6 = 34.7$ t $> V_u (= 7.9$ t) OK

처짐검토

· 고정하중(콘크리트 양생 전)에 의한 처짐

$$\delta_{D1} = \frac{5 W_{D1} l^3}{384 E I_s} = \frac{5\times(0.29\times2.5\times7.2)\times720^3}{384\times2100\times7210}$$

$= 1.68$ cm 치올림불필요

· 등가 단면2차 모멘트

$I_{tr} = 26942\ cm^4$

· 마감하중(콘크리트 양생후 추가)에 의한 처짐

$$\delta_{D2} = \frac{5 W_{D2} l^3}{384 E I_{tr}} = \frac{5\times(0.11\times2.5\times7.2)\times720^3}{384\times2100\times26942}$$

$= 0.17$ cm 치올림불필요

· 적재하중에 의한 처짐

$$\delta_L = \frac{5 W_L l^3}{384 E I_{tr}} = \frac{5\times(0.25\times2.5\times7.2)\times720^3}{384\times2100\times26942}$$

$= 0.39$ cm $< \frac{l}{350}$ $(= 2.06$ cm)

· 고정하중과 적재하중에 의한 처짐

$\delta_{D1} + \delta_{D2} + \delta_L = 1.68 + 0.17 + 0.39$

$= 2.24$ cm $< \frac{l}{250}$ $(= 2.88$ cm) $\therefore$ 치올림 불필요

4. 바닥진동 검토 및 설계결과 비교

합성보 설계과정에서 검토하였던 특수교실동의 2SB1(H-300×150×6.5/9)는 기존의 허용응력 설계법에서는 H-350×175×7/11 이 적용되었던 부재이다.

합성보의 설계과정에서 시공시와 사용시의 정적 처짐에 대하여 검토한 결과, 사용이 가능한 것으로 판정되었다. 동일한 부재에 대하여 보행하중에 의한 바닥진동을 검토하여 사용성을 평가하였다.

수정 Reiher - Meister 척도(Modified Reiher - Meister Scale)와 Murray의 제안식을 사용하여, 노출합성보가 지지하는 특수교실동의 2층바닥에 대한 사용성을 평가하기 위해 동적 특성을 계산한 결과 다음과 같이 판정되었다.

진동수(frequency)	38.43	Hz
변위진폭(initial amplitude)	0.077	in
필요 최소감쇄비(Damping)	12.91	%
반응도(sensitivity)	Strongly perceptible(Unacceptable)	

바닥진동의 검토결과 보행자의 발뒤꿈치 하중(hill drop vibration)에 대하여 특수교실동 2층 슬래브는 강하게 감지할 수 있을만큼 큰 진동이 유발되는 것으로 판정되었다.

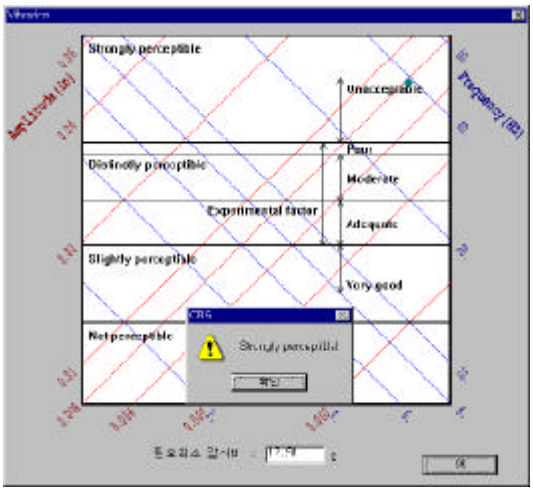


그림 8. Modified Reiher-Meister Scale

골조의 물량을 절감하기 위해 한계상태법을 도입하여 구조설계를 수행하였으나, 전술한 바와 같이 지붕에서의 정적처짐 그리고, 바닥진동의 검토를 통해 구조부재의 강성이 문제시 되고 있으므로, 사용성이 개선되기 위해서는 허용응력 설계에서 산출한 단면이 그대로 적용되어야 했다.

표2와 3은 각 동별 2층 주요 부재에 대하여 허용응력설계법과 한계상태 설계법에 의한 단면치수를 비교한 것이다.

대부분의 부재에서 한계상태 설계법이 허용응력 설계법보다 더 작은 단면이 선택되었다. 그러나 부재강성의 감소가 학교건물의 사용성에 영향을 미치는 부재에 대해서는 동일한 단면을 적용하였다.

표4는 두가지 설계법으로 수행한 구조설계 결과 산출된 주골조의 물량을 비교한 것이다.

단면치수의 감소에서 예상되었듯이 약 12%의 자재비 감소효과를 기대할 수 있다.

철근콘크리트조로 시공된 학교시설의 골조공사비가 철골구조보다 약 15% 정도 저렴한 것으로 조사되었으므로, 철골공사시 한계상태 설계법으로 구조계산을 수행하면 골조공사비 차액을 만회할 수 있을 것으로 판단된다.

표. 2 일반교실동의 단면치수 비교

부 재 명	허용응력 설계법	한계상태 설계법
SG1	H 244×175×7/11	H 248×124×5/8
SG2	H 496×199×9/14	H 496×199×9/14
SG3	H 400×200×8/13	H 396×199×7/11
SG4	H 496×199×9/14	H 450×200×9/14
SG5	H 350×175×7/11	H 350×175×7/11
SG6	H 194×150×6/9	H 194×150×6/9
SG7	H 400×200×8/13	H 350×175×7/11
SB1	H 244×175×7/11	H 244×175×7/11
SCG1 SCB1	H 244×175×7/11	H 244×175×7/11
C1 C3	H 450×200×9/14	H 400×200×8/13
C2	H 340×250×9/14	H 340×250×9/14
C4	H 294×200×8/12	H 294×200×8/12

표 3. 관리특수 교실동의 단면치수 비교

부 재 명	허용응력 설계법	한계상태 설계법
SG1	H 350×175×7/11	H 300×150×6.5/9
SG2	H 350×175×7/11	H 300×150×6.5/9
SG3	H 250×125×6/9	H 298×149×5.5/8
SG4	H 350×175×7/11	H 396×199×7/11
SG5	H 400×200×8/13	H 350×175×7/11
SG6	H 250×125×6/9	H 250×125×6/9
SG7	H 600×200×11/17	H 600×200×11/17
SG8	H 496×199×9/14	H 496×199×9/14
SB1	H 350×175×7/11	H 350×175×7/11
SCG1 SCB1	H 244×175×7/11	H 244×175×7/11

표 4. 허용응력 설계법과 한계상태 설계법의 철골 주골조 물량 비교(ton)

구 분		허용응력 설계법	한계상태 설계법	한계/허용×100(%)
일반교실	보	155.8	124.1	79.7
	기둥	59.6	58.4	98.0
	소계	215.4	182.5	84.7
특수교실	보	121.1	107.1	88.4
	기둥	64.3	61.0	94.7
	소계	185.4	168.1	90.7
총 계		**400.8**	**350.6**	**87.5**

5. 결론

국내에서 철골구조의 한계상태 설계법은 1997년 법제화되었음에도 아직 뿌리를 내리지 못하고 있다. 한계상태 설계법은 능동적이고 합리적인 구조설계를 가능하게 하는 장점이 있어 국외에서는 널리 적용되고 있으며, 허용응력 설계보다 경제적인 설계를 가능하게 한다는 사실을 실례를 통해 확인할 수 있었다.

허용응력 설계법이 적용된 철골조 학교시설에 대해 한계상태 설계법으로 재설계를 수행하여, 정적 처짐 및 진동문제에 대한 사용성을 만족하는 범위내에서 10 15% 정도의 골조물량 감소 효과를 얻어내었다. 그러나, 한가지의 예제를 대상으로 수행된 결과이므로 그 경향은 확인할 수 있겠지만, 수치자체에 별다른 의미를 부여할 수는 없다.

한편으로, 최적화 기법으로 설계된 학교시설은 기존의 설계법에 비해 횡력저항 시스템의 강성이 저하되어 다소 증가된 횡변위를 보인다. 이러한 경향은, 앞으로 건축되는 학교시설에 적용될 하중 기준(대한건축학회, “건축물 하중기준 및 해설”, 2000)이 기존의 “건축물의 구조기준 등에 관한 규칙” 보다 다소 증가된 횡하중을 적용한다는 점에 착안할 때, 구조설계의 경제성을 좌우하는 중요한 요인이 된다. 그러므로, 철골골조(frame)가 모든 연직하중과 횡력에 저항하는 기존의 철골조 학교시설의 구조형식으로는 새로운 하중기준에 대해서 경제적인 구조설계를 보장할 수 없다. 따라서, 내부의 스터드 벽이나 측벽에 인장 스트랩이 내장된 X-브래이싱 전단벽을 사용하여, 횡력에 대한 사용성 및 안정성을 확보하는 것이 바람직하다.