

유리 용해로 축열실 상재 하중 증가에 따른 Rider Arch의 안전성 검토

이선영, 김종옥*, 임대영*, 김택남*, 박원규*
안성유리(주) 생산부 요료과
*배재대학교 신소재공학부

A Stability Study of Rider Arch under the Increased Load of Checker Brick in Regenerator of the Reformed Glass Melting Furnace

Sun-Young Lee, Jong-Ock Kim, Dae-Young Lim, Taik-Nam Kim, and Won-Kya Park
An Sung Glass Ind. Co. Ltd, Chunan City, Chung Nam, Korea
Division of Advanced Materials Engineering., Paichai University

유리용해로의 축열실은 폐연소가스로 열을저장하며, 유리용해로에 유입되는 흡입공기를 예열시키는 역할을 한다. 유리용해산업에서 연료소비를 줄이기 위하여 절연법, 단열벽돌, 공기누출등이 오래 연구되었다. 또한 새로운 형태의 단열벽돌과 Rider arch가 유리용해로의 수명연장을 위하여 연구되고 있다. 본 연구는 연구대상공장의 이전설치시 유리용해로의 축열실이 5.64m에서 7.89m로 높이가 높아졌고 이에 따른 축열실 하중증가에 의하여 Rider arch가 더 높은 응력을 받게 되었다. 이런 조건에서 Rider arch의 기계적 안정성을 본 연구에서 검토하였다. 계산식에 의하면 하중증가에 따른 Rider arch의 응력은 안전한 것으로 평가되었고 Rider arch가 견딜수 있는 최대 압축응력은 163kg/cm²이고, 최대전단응력은 6.37kg/cm²이다.

The regenerator is important part of the glass melting furnace to increase the temperature of the intake air through the combustion flame. The insulation, checker brick, prevention of the air leak has been studied to decrease the fuel consumption in glass melting industries. Thus the new types of checker brick and the design of the rider arch has been studied to prolong the life of the glass melting furnace.

The height of the regenerator increased from 5.64 m to 7.89 m in the reforming of the glass melting furnace. Thus the stability of the rider arch is studied under the condition of increased load of checker brick in this research.

The rider arch was estimated to be stable inspite of the increase of load according to the calculation. The max. sustained compressive stress of the rider arch is 163 kg/cm² and the max. sustained shear stress is 6.37 kg/cm².

Key words : regenerator, glass melting furnace, rider arch

I. 서 론

유리 용해로에서 축열실의 역할은 Flame의 온

도를 증가시키기 위한 Combustion Air의 예열이며, 폐가스의 열회수를 통한 연료(Fuel) 소비의 절감이다. 근래의 유리 용해로 축열실은 에너지

절약 관점에서 절연(Insulation)의 강화, Checker brick type, Air leak 방지등에 관해 여러 대책이 강구되고 있으며 특히 용해로 수명의 장기화 요구에 따른 Checker brick 및 Rider arch 설계는 더욱 중요해지고 있다.^[1,4-6]

연구 대상인 용해로는 이전 설치시 공장건물의 구조적인 조건으로 축열실 높이가 높아져 Checker brick height가 기존 5.64m에서 신설 7.89m로 2.25m 높아지게 되었고, 이에 따른 Checker brick weight 증가로 Rider arch의 안전성에 대한 검증이 필요하였으며, 이를 구조역학적 계산으로 검토코져 하였다.

II. 실험방법

Arch는 曲線材로 만들어 外力에 저항하도록 하는 構造物로서 단면에는 전단력(shearing force), 모멘트(moment), 軸方向力(axial force)이 생기나 주로 축방향력에 저항하는 구조이다. 따라서 구조물은 그 목적과 환경이 외력에 대해 충분한 강도와 안전성이 확보되어야 한다.

연구대상 용해로의 하중증가에 따른 Rider arch의 구조적 안전성을 해석적 방법과 유한요소 해석으로 계산하였다.^[1-3]

2.1 Rider arch의 기능과 재질선정

Rider arch 는 축열실 Checker brick의 Loading weight를 직접 받는 곳으로 축열실 안전에 최우선 고려되어야 할 부위이다. 온도조건은 500℃ 내외이나 상재하중과 폐가스영향을 고려하여 재질 선정시 높은 압축강도와 저기공율이 요구된다.

Table 1은 연구대상 용해로에 적용된 Rider arch 재질사양과 일반적인 외국회사들의 추천재질이다.

2.2 Rider arch의 안전성 계산의 일반조건

연구대상 용해로 축열실의 Rider arch는 반경(r) 1.295m인 180° 반원형으로 설계되었으며, 구조적인 조건으로 축열실 Checker brick height가 2.25m 높아지므로써 이에 따른 Checker brick 하중이 Single chamber 기준 종래 77 ton에서 신설 102 ton으로 25 ton이 증가되어 Loading

weight가 32.5% 상승하므로써, 이에 따른 Rider arch 안전성을 계산 검토하였다. Fig.1은 연구대상 용해로의 Checker brick packing에 따른 Rider arch의 상재하중을 나타내고 있다.

Table 1. Refractories Specitication for Rider arch

Properties	A	H	
Refractoriness(SK)	35		
Apparent porosity(%)	13	35	
Bulk density		12.5	
Cold crushing strength (kg/cm ²)	2.33	2.36	
	650	680	
Refractoriness under load (2kg/cm ² .T ₂ °C)	1510		
Permanent linear(%) change(1500°C×2hrs)	0	-0.1	
Thermal expansion(%) (at 1000°C)	0.6		
Chemical composition	Al ₂ O ₃	42.2	45
	Fe ₂ O ₃	1.2	1.1

A : 연구대상 용해로
H : 외국회사 용해로

Rider arch의 안전성 검토를 위해 다음 3가지를 기초로 하여 계산하였으며 Rider arch 하중상태는 Fig.2에 나타내고 있다.

(1) Rider arch brick 간의 Sliding은 고려되지 않았다.

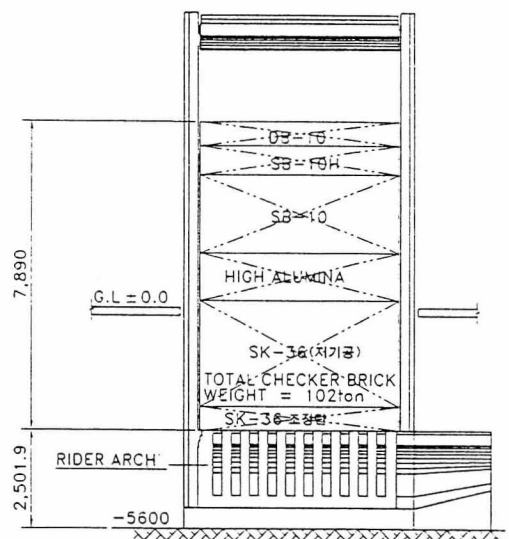


Figure 1. Checker loading weight of rider arch

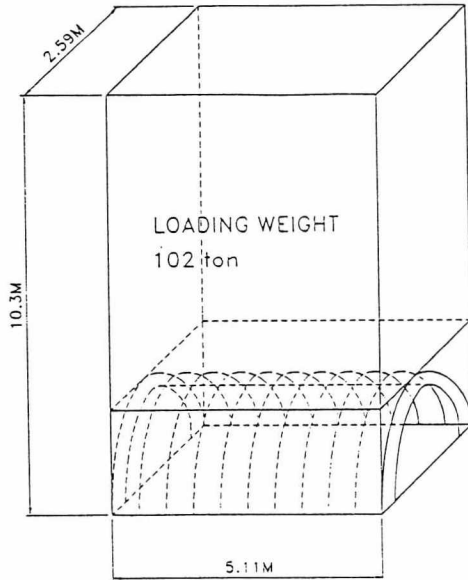


Figure 2. Loading condition of rider arch

(2) Rider arch의 압축강도는 650 kg/cm^2 , 하중 연화점은 1510°C , 내화도는 SK-35이다.

(3) Rider arch 부위의 온도조건은 500°C 내외이므로 고온에 따른 열팽창 및 하중 연화에 대한 문제는 크지 않아 고려하지 않았다.

III. 실험 결과 및 검토

3.1 Rider arch의 하중조건 및 계산

일반적으로 구조물에 外力(External force)이 작용하면 구조물은 内力(Internal force)이 발생하는데 이와 같이 물체내부에 생기는 힘(단위면적당 힘)을 應力(stress) 이라하며, 이 응력을 발생하게 하는 외적작용을 荷重이라한다.

축열실 Rider arch는 Checker brick packing이 완료됨으로서 Dead load 조건하에 놓이게 된다. 따라서 연구대상 용해로 Rider arch의 하중조건을 계산하여 보면, 축열실 Single chamber size는 $5.11\text{m} \times 2.59 \text{ m}$ 이며 Single chamber에 축조된 10개의 Rider arch는 total 102 ton의 Load condition에 놓이게 된다. 이것을 Single chamber의 단위면적당 Load weight로 계산해보면 다음과 같다.

(1)축열실 단위면적당 하중을 (W_1)이라하면 다음과 같다.

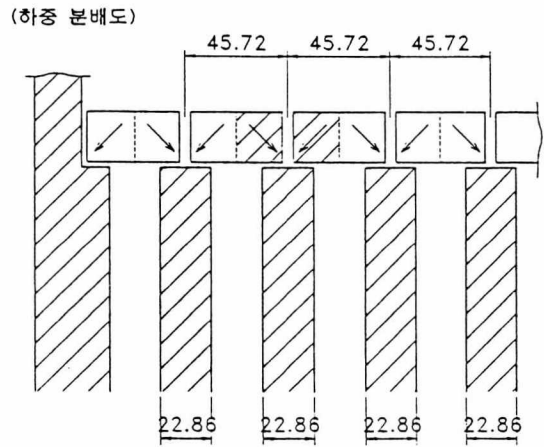


Figure 3. Load distribution of rider arch

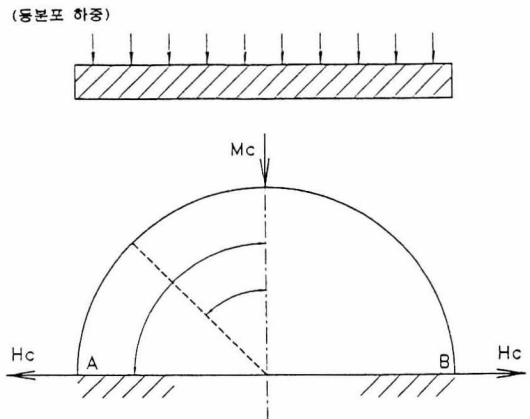


Figure 4. Uniform distributed load of rider arch

$$W_1 = (102\text{ton} \times 1000\text{kg/ton}) / \{(5.11\text{m} \times 100\text{cm} / \text{m}) \times (2.59\text{m} \times 100\text{cm} / \text{m})\}$$

$$= \frac{102\text{kg}}{132,349\text{cm}^2} = 0.77\text{kg/cm}^2$$

(2) Rider arch 1개가 받게되는 하중분배(W_2)는 Fig.3에 나타냈고 이를 계산하면 다음과 같다.

$$W_2 = 0.77 \text{ kg/cm}^2 \times (259 \text{ cm} \times 22.86 \text{ cm} \times 2)$$

$$/ \text{one rider arch}$$

$$= 9,118 \text{ kg/one rider arch}$$

(3) Rider arch 1개가 받는 길이당 등분포 하중은 Fig.4에 표시 했고 이를 계산하면 다음과 같다.

$$W_3 = 9,118 \text{ kg} / 259 \text{ cm} = 35.2 \text{ kg/cm}$$

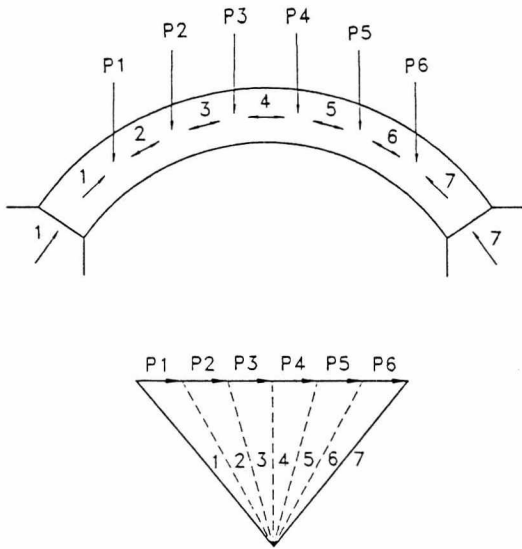


Figure 5. Stress distribution of rider arch

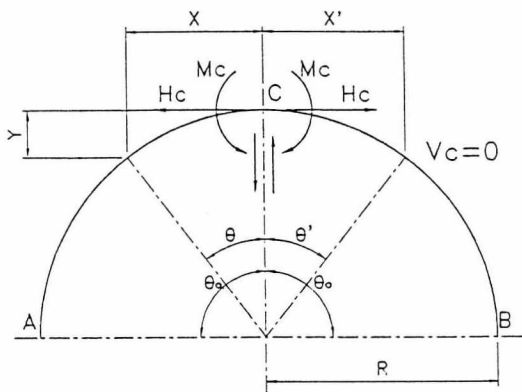


Figure 6. Schematic drawings of stress intensity in rider arch

3.2 상재하중에 의한 수평응력과 Moment 계산

石材나 Brick을 쌓아서 만든 Arch는 Arch 단면에 휨모멘트(bending moment)가 발생되지 않도록 설계되어야 하며, 이런 Arch를 강성(剛性) Arch라 한다.^[1-4]

이같은 강성 Arch에서는 하중과 반력의 합력선(合力線)이 Arch 단면의 중앙 1/3에 들도록 해

야한다. 즉 Fig.5에 나타나 있는바와 같이 連力圖의 극사선(極射線) 2,3,4,5,6등이 그 부분의 Arch 단면의 중앙 1/3안에 들도록 해야한다. 그러면 Arch 단면에는 압축력만이 작용하게 되고引張은 붙어나지 않는다.

Checker brick의 상재하중이 Rider arch에 영향을 주게되는 수평응력과 Moment는 Fig.6에 나타내고 있으며 계산식을 참고하면 다음과 같이 계산된다.

(1) 수평응력(Hc)

수평응력(Hc)은 Rider arch 상재하중에 의해 Rider arch 중심 좌우로 밀려나려는 힘이며 계산하면,

$$H_c = \frac{\int ds \int M_0 y ds - \int M_0 ds \int y ds}{\left(\int y ds\right)^2 - \int ds \int y^2 ds}$$

$$= \frac{[407cm \times (-)195,982,989kg.cm^3 - (-)2,627,098kg.cm^2 \times 19,152cm^2]}{\{(366,784,759cm^4) - (407cm \times 1,548,456cm^3)\}}$$

$$= 111.8 kg$$

(2) Moment (Mc)

C 점에서 상재하중이 Rider arch에 힘으로 작용하는 Moment이며 다음과 같이 계산된다.

$$M_c = \frac{H_c \int y ds + \int M_0 ds}{\int ds}$$

$$= \frac{111.8 \times 19,152 + (-2,627,098)}{407}$$

$$= -1,193.9 kg.cm$$

3.3 Rider arch의 Section별 응력계산

Arch에 외력이 작용하면 Arch는 평형상태를 유지하기 위해 내부에는 크기가 같고 방향이 반대인 그외력에 대응하는 힘 즉 응력(stress)이 발생하는데, Arch를 설계하기 위해서는 이 응력의 상태를 정확하게 알아야하며 응력 상태는 Arch의 단면에 따라 변화한다.

연구대상 용해로 Rider arch를 30° 와 각기 15° 씩 Section으로 구분하면 Fig.7같이 ㉔, ㉑, ㉒, ㉓, ㉔, ㉕의 단면에서 발생하는 응력을 계산할 수 있다.

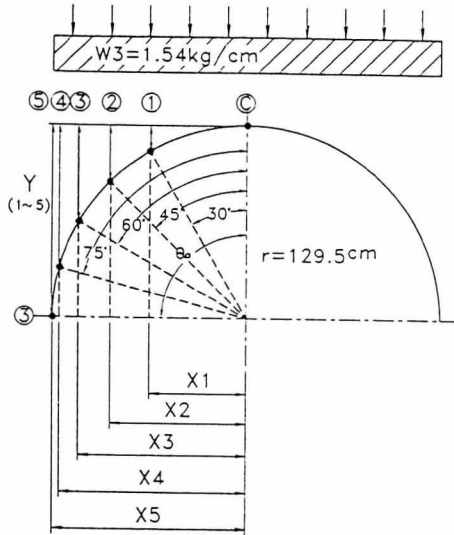


Figure 7. Section of rider arch to calculate the stress

Fig.7에서 각 section에서 $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_4, y_4, x_5, y_5$ 의 길이를 구하면 다음과 같으며 Rider arch 각 Section에서 단면적(A)은 30.48cm^2 이다.

$$\begin{aligned} x_1 &= 64.75 \text{ cm} & y_1 &= 17.35 \text{ cm} \\ x_2 &= 91.57 \text{ cm} & y_2 &= 37.93 \text{ cm} \\ x_3 &= 112.15 \text{ cm} & y_3 &= 64.75 \text{ cm} \\ x_4 &= 125.09 \text{ cm} & y_4 &= 95.98 \text{ cm} \\ x_5 &= 129.5 \text{ cm} & y_5 &= 129.5 \text{ cm} \end{aligned}$$

(A) Section ⑤지점에서의 단면력(section force)을 계산하면, Moment(M_c), 수평력(H_c), 전단력(Q_c)을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} M_c &= -1193.9 \text{ kg} \cdot \text{cm} \\ H_c &= 111.8 \text{ kg} \quad (3.67 \text{ kg/cm}^2) \\ Q_c &= 0 \end{aligned}$$

(B) Section ①지점에서의 단면력을 구하면 ($\theta = 30^\circ, x_1 = 64.75\text{cm}, y_1 = 17.35\text{cm}$)

$$\begin{aligned} M_1 &= M_c + H_c \cdot y_1 - \frac{w_3 \cdot (x_1)^2}{2} \\ &= -1193.9 \text{ kg} \cdot \text{cm} + 111.8 \text{ kg} \times 17.35 \text{ cm} \\ &\quad - \frac{1.54 \text{ kg/cm} \times (64.75 \text{ cm})^2}{2} \\ &= -2,482.44 \text{ kg} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

$$H_1 = -w_3 x_1 \sin \theta - H_c \cos \theta$$

$$\begin{aligned} &= -1.54 \text{ kg/cm} \times 64.75 \text{ cm} \times \sin 30^\circ \\ &\quad - (111.8 \text{ kg} \times \cos 30^\circ) \\ &= -146.7 \text{ kg} \Rightarrow (-4.81 \text{ kg/cm}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_1 &= w_3 \cdot x_1 \cdot \cos \theta - H_c \sin \theta \\ &= 1.54 \text{ kg/cm} \times 64.75 \text{ cm} \times \cos 30^\circ \\ &\quad - 111.8 \text{ kg} \times \sin 30^\circ \\ &= 30.45 \text{ kg} \Rightarrow (1 \text{ kg/cm}^2) \end{aligned}$$

(C) Section ②지점에서의 단면력을 구하면 ($\theta = 45^\circ, x_2 = 91.57\text{cm}, y_2 = 37.93\text{cm}$)

$$\begin{aligned} M_2 &= -1,193.9 \text{ kg} \cdot \text{cm} + 111.8 \text{ kg} \times \\ &\quad 37.93 \text{ cm} - \frac{1.54 \text{ kg/cm} \times (91.57 \text{ cm})^2}{2} \\ &= -3,409.8 \text{ kg} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_2 &= -1.54 \text{ kg/cm} \times 91.57 \text{ cm} \times \sin 45^\circ \\ &\quad - 111.8 \text{ kg} \times \cos 45^\circ \\ &= -178.7 \text{ kg} \Rightarrow (-5.86 \text{ kg/cm}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= 1.54 \text{ kg/cm} \times 91.57 \text{ cm} \times \cos 45^\circ \\ &\quad - 111.8 \text{ kg} \times \sin 45^\circ \\ &= 19.7 \text{ kg} \Rightarrow (0.68 \text{ kg/cm}^2) \end{aligned}$$

(D) Section ③지점에서의 단면력을 구하면 ($\theta = 60^\circ, x_3 = 112.15\text{cm}, y_3 = 64.75\text{cm}$)

$$\begin{aligned} M_3 &= -1193.9 \text{ kg} \cdot \text{cm} + 111.8 \text{ kg} \times \\ &\quad 64.75 \text{ cm} - \frac{1.54 \text{ kg/cm} \times (112.15 \text{ cm})^2}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= -3639.6 \text{ kg} \cdot \text{cm} \\ H_3 &= -1.54 \text{ kg/cm} \times 112.15 \text{ cm} \times \sin 60^\circ \\ &\quad - 111.8 \text{ kg} \times \cos 60^\circ \\ &= -205.5 \text{ kg} \Rightarrow (-6.74 \text{ kg/cm}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_3 &= 1.54 \text{ kg/cm} \times 112.15 \text{ cm} \times \cos 60^\circ \\ &\quad - 111.8 \text{ kg} \times \sin 60^\circ \\ &= 10.5 \text{ kg} \Rightarrow (0.34 \text{ kg/cm}^2) \end{aligned}$$

(E) Section ④지점에서의 단면력을 구하면 ($\theta = 75^\circ, x_4 = 125.09\text{cm}, y_4 = 95.98\text{cm}$)

$$\begin{aligned} M_4 &= -1,193.9 \text{ kg} \cdot \text{cm} + 111.8 \text{ kg} \times \\ &\quad 95.98 \text{ cm} - \frac{1.54 \text{ kg/cm} \times (129.09 \text{ cm})^2}{2} \\ &= -3,294.8 \text{ kg} \cdot \text{cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_4 &= -1.54\text{kg/cm} \times 125.09\text{cm} \times \sin 75 \\
 &\quad - 111.8\text{kg} \times \cos 75 \\
 &= -215.01\text{kg} \Rightarrow (-7.05\text{kg/cm}^2) \\
 Q_4 &= 1.54\text{kg/cm} \times 125.09\text{cm} \times \cos 75 \\
 &\quad - 111.8 \times \sin 75 \\
 &= -58.13\text{kg} \Rightarrow (-1.91\text{kg/cm}^2)
 \end{aligned}$$

(F) Section ⑤ 지점에서의 단면력을 구하면
 ($\theta = 90, x_5 = 129.5\text{cm}, y_5 = 129.5\text{cm}$)

$$\begin{aligned}
 M_5 &= 0 \\
 H_5 &= -1.54\text{kg/cm} \times 129.5\text{cm} \times 1 \\
 &= -199.4\text{kg} \Rightarrow (-6.54\text{kg/cm}^2) \\
 Q_5 &= -111.8\text{kg} \Rightarrow (-3.67\text{kg/cm}^2)
 \end{aligned}$$

참조 : 계산식

$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} \int ds &= 2R\theta_0 \\
 &= 2 \times 129.5\text{cm} \times 1.571 = 407\text{cm} \\
 \textcircled{2} \int yds &= 2R^2(\theta_0 - \sin \theta_0) \\
 &= 2 \times (129.5\text{cm})^2 \times (1.571 - 1) \\
 &= 19,152\text{cm}^2 \\
 \textcircled{3} \int y^2 ds &= 2R^3 \left(\frac{3}{2} \theta_0 - 2\sin \theta_0 + \frac{1}{4} \sin 2\theta_0 \right) \\
 &= 2 \times (129.5\text{cm})^3 \left(\frac{3}{2} \times 1.571 - 2 \times 1 \right) \\
 &= 1,548,456\text{cm}^3 \\
 \textcircled{4} (\int yds)^2 &= 4R^4(\theta_0 - \sin \theta_0)^2 \\
 &= 4 \times (129.5\text{cm})^4 \times (1.571 - 1)^2 \\
 &= 366,784,759\text{cm}^4 \\
 \textcircled{5} \int M_0 y ds &= -WR^4 \left(\frac{1}{2} \theta_0 - \sin \theta_0 \cos \theta_0 - \frac{1}{3} \sin^3 \theta_0 \right) \\
 &= 1.54\text{kg/cm} \times (129.5\text{cm})^4 \times \left(\frac{1.571}{2} - \frac{1}{3} \right) \\
 &= 195,982,989\text{kg} \cdot \text{cm}^3 \\
 \textcircled{6} \int M_0 ds &= -WR^3 \cdot \frac{1}{2} (\theta_0 - \sin \theta_0 \cos \theta_0) \\
 &= 1.54\text{kg/cm} \times (129.5\text{cm})^3 \times \frac{1.571}{2} \\
 &= 2,627,098\text{kg} \cdot \text{cm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \textcircled{7} Hc &= \frac{\int ds \int M_0 y ds - \int M_0 ds \int y ds}{(\int yds)^2 - \int ds \int y^2 ds} \\
 &= \frac{[407\text{cm} \times (-)195,982,989\text{kg} \cdot \text{cm}^3 - (-)2,627,098\text{kg} \cdot \text{cm}^2 \times 19,152\text{cm}^2]}{\{(366,784,759\text{cm}^4) - (407\text{cm} \times 1,548,456\text{cm}^3)\}} \\
 &= 111.8\text{kg}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \textcircled{8} Mc &= \frac{Hc \int yds + \int M_0 ds}{\int ds} = \{111.8\text{kg} \times 19,152\text{cm}^2 + (-2,627,098\text{kg} \cdot \text{cm}^2)\} / 407\text{cm} \\
 &= -1,193.9\text{kg} \cdot \text{cm}
 \end{aligned}$$

IV. 결 론

1. Rider arch 상재하중에 대하여 각 단면에서 발생하는 응력은 지지부를 제외한 단면은 상재하중에 대하여 안정한 것으로 평가 되었다.
2. Section ③④⑤에서 발생하는 수평응력은 보강이 필요한 것으로 판단되었다
3. 응력계산결과 반원형 Rider arch section에서의 수평전단응력은 75° 일때 가장 큰 응력을 나타내었다.
4. 구조물의 안전성은 다음 응력값으로 비교 검토할 수 있다.

- 허용압축응력 $\sigma_{ca} = 0.25\sigma_{ck} = 163\text{kg/cm}^2$
- 허용전단응력 $\tau_c = 0.25\sqrt{\sigma_{ck}} = 6.37\text{kg/cm}^2$

V. 감사의 글

본연구는 배재대학교 1997년도 교내 연구비지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

VI. 참고문헌

1. 前田幸彦, “構造力學公式”, 技報堂 日本土木學會, p254~255 昭和49年 12月15日
2. 申鉉默, “構造力學”, 學研社 p18~19 p178~179(1996)

3. 이정은 "應用力學試驗研究", 일진사, p203, (1996)
4. 蔣東燐, "解法構造力學" 技文堂, p96~97(1996)
5. 도로교 표준시방서, 建設部,(1992), p723~724
6. A사 유리용해로 도면
7. "특수점토 내화물사양", (株) 昌原耐火 p14
8. Hepworth refractories.LTD, 내화물 사양