日本에서의 膜構造物 現況+

The Air Domes in Japan

佐 野 武 仁*
T . Sano

1. 日本의 膜構造建築

現存하는 資料中에서 가장 오래된 膜構造로서 確認되어 있는 것은 폼페이 圓形劇場上部에 設置된 可動式사스펜숀膜構造(紀元 59年)이며, 그 研究結果가 R. Grafe(西獨)에 의해

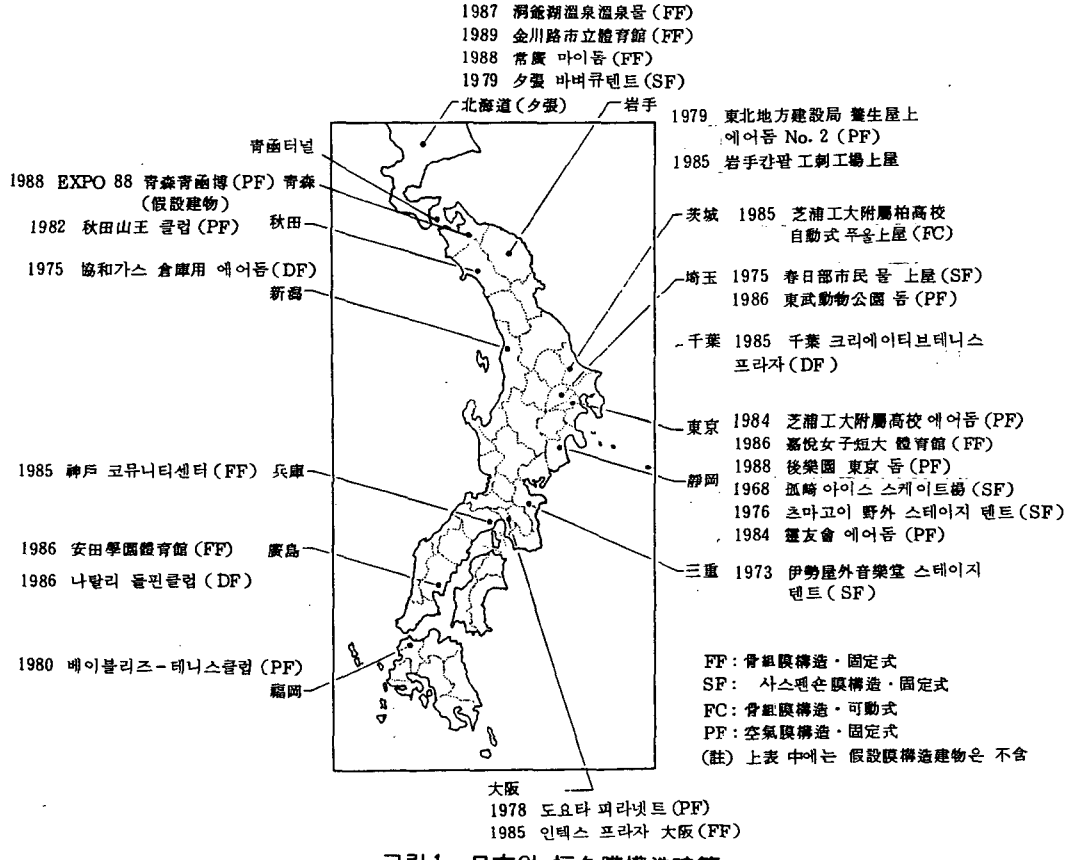


그림 1. 日本의 恒久膜構造建築

* 昭和女子大學 教授
+ 본 기사는 1989 년도 하계학술강연회에서 발표되었으며, 본 학회 前 會長 金孝經 教授가 번역하였음.

서 1978年에 發表되었다. 日本에 現存하는 資料중에서 가장 오랜 것으로 보여지는 것은, 1950年에 木下서어커스가 서어커스室로서 建立한 固定式사스펜숀式 膜構造였다. 그후 1965年 後樂園아이스스케이트링크建物(固定式吊構造)로서 出現하는 등 記錄에 남아있는 例는 稀少하다. 그러나 1970年 萬國博覽會가 大阪의 吹田市에서 開催되여, 이것을 機會로 膜의 使用頻度는 大幅으로 伸張하고 이어서 博覽會로서는 沖繩海洋博, 神戶포트피아博, 科學博, 其他 地方博으로서는 靑森靑函連絡博, 現在 開催中의 開港 100周年記念橫濱博 등 多數의 博覽會用 施設 등 假設建築物로서의 利用이 많다. 이것과 平行해서 恒久膜으로서는 그림1에 表示하는 바와 같이 野球場, 테니스클럽, 體育館, 아이스스케이트場, 풀場 등 大空間을 構成하는 建物로서의 使用이 顯著하다. 그 중에서도 東京돔(後樂園의 野球場)은 延面積 10萬m², 收容人員 55,000名의 野球, 美式蹴球, 歌謠쇼우, 音樂會, 自動車新製品發表 등의 展示가 이루어지는 施設로서 日本에서는 最大規模의 施設이며 各種의 競技와 行事會場으로서 使用되고 있다. 2,000m² 以上으로서 日本建築센터의 評定을 받은 膜構造建築物은 假設과 恒久膜構造를 포함해서 三百數十例에 이르고 있다.

2. 膜構造建築物의 分類

膜構造建築物의 分類를 그림2에 表示한다. 一般的으로 膜構造物은 骨組膜構造, 사스펜숀膜構造, 空氣膜構造의 3種類로 分類된다. 骨組形은 鐵骨 등의 骨組로서 形體를 만들고 그 表面에 膜材料를 添付하는 方法이며, 神戶포트피아國際廣場 등에 採用되고 있다. 또 사스펜숀形은 吊構造를 뜻하는 것이며, 膜材料를 主體로해서 이 膜을 構造體인 鐵骨에 매달으는 方法이며 日本에서 가장 많이 使用되고 있다. 空氣膜構造는 室內外의 空氣壓力差를 10~30mmAq 程度로 하며, 室內壓力을 多少 높

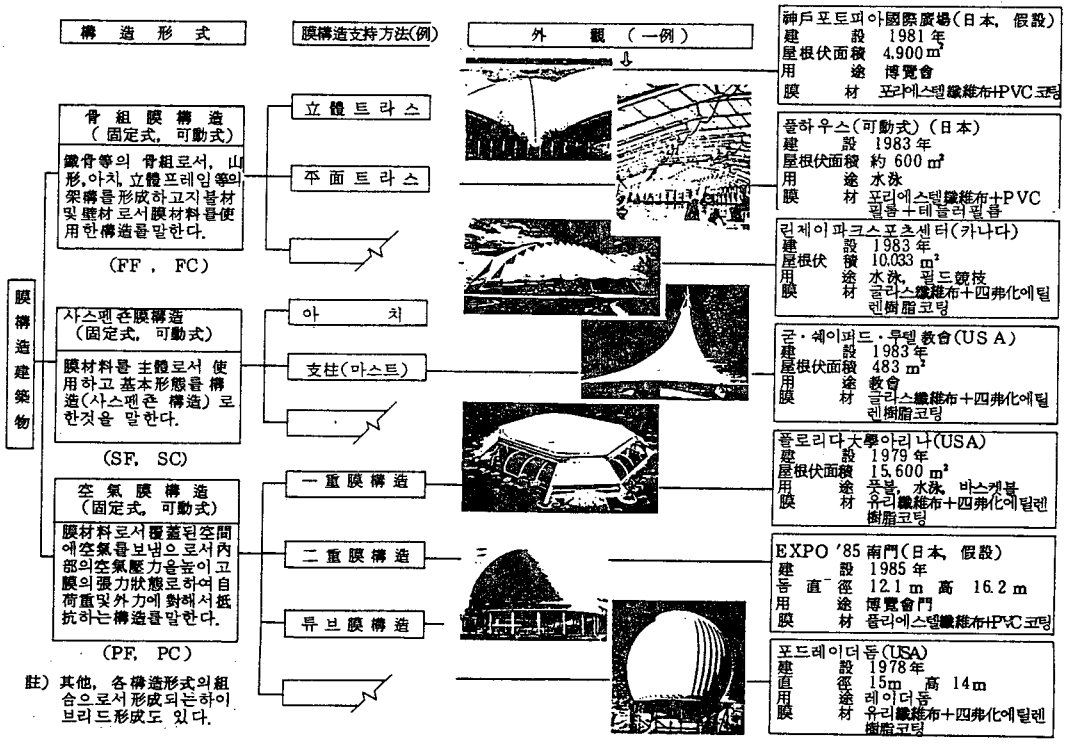


그림2. 膜構造物의 分類

게 하여 室內外의 差壓으로서 膜의 形狀을 維持하는 方法이며, 1邊 100m 以上의 大空間을 鐵骨없이 膜과 이것을 누르는 텐숀로우프로서 支持하는 方法이며, 東京 돔과 같이 建物의 지붕으로서 使用된다. Low rise type air dome(rise 高/底邊<0.2)과 high rise type(rise 高/底邊>0.2)의 3種類로 區分된다. 後述하는 靑函博에어돔은 high rise type 이며, 村田, 井上, 川口, 筆者 등이 開發한 것이다.

3. 膜構造建築物에 대한 앙케이트調査

日本膜構造協會, 膜構造物開發委員會의 膜構造의 將來性에 대한 調査資料가 있음으로 이를 表1~4에 表示한다.

앙케이트調査는 318個의 企業에 부탁하여 143件의 回答을 얻었다. 各 企業平均의 回答率은 45%이다. 또 企業의 內譯은 A~E群의 5群으로 나누어서 調査하였다. 앙케이트중에서, 膜構造建築物의 可能性에 대해서는 大스팬의 構築이 比較的 廉價로 될 수 있다는 結論을 얻고 있으나, 筆者의 經驗으로서는 테프론膜을 使用할 때는 膜材가 가지는 透光性 등도 優秀하고, 유리를 통해서 들어오는 晝光과 같은 效果가 있어 光의 부드러움을 느끼고, 대단히 有效한 晝光利用이 될 수 있는 것으로 생각된다.

膜構造의 期待耐用年數에 대해서는 5年以下의 短期使用에 適合하다고 생각하는 것이 大勢이나, 近年에는 恒久施設(耐用年數 20~30年)로서의 使用希望이 增加하고 있다. 또 各種 建物로서의 利用度 期待値는, 運動施設, 商業施設, 屋外施設에 期待値가 높고, 특히 運動施設의 期待値는 월등 높은 값을 表示하고 있다. 大空間의 必要性, 低廉性 등을 생각하면, 옳은 解答이라고 볼 수 있다. 日本에서도, 膜構造의 期待値는 東京以北의 寒冷地가 높고, 더구나 積雪地帶에 그 期待가 크다. 冬節에 屋外스포츠가 困難한 地方에서는 晴天時의 太陽을 建物內에 導入하여 準屋外로서의 스포츠施設로서 그 要求가 높은 理由라고 볼 수 있다. 年間을 통한 室內의 溫熱環境, 冬期의 結露등

表1. 調査回答率

調査區分등	對象數(件)	回答數(件)	回答率(%)
A群 自治體, 防衛廳	105	64	60.95
B群 請負業者	78	32	41.02
C群 設計事務所	40	14	35.00
D群 住宅·都市整備公團	23	12	52.17
E群 諸企業등 유저	72	21	29.16

表3. 膜構造를 使用한 建築物의 期待使用年數

設問	1位得點	2位得點	3位得點
A. 恒久的使用	39點	17點	75點
B. 中期的使用(5~10年)	28↑	73	30
C. 短期的使用(5年以下)	67↑	41	26

* 5年以下의 短期的使用에 適合하다고 생각하는 者가 大部分이다. 近年에는 恒久施設로서의 要望이 많아지고 있다.

表2. 膜構造建築物의 將來의 可能性

調査項目	1位得點	2位得點	3位得點	合計得點	期待順位등(約%)
A. 價格	16	38	19	73	②(17.4)
B. 簡易性 또는 假設性	16	22	26	64	③(15.2)
C. 輕量性	4	16	28	48	④(11.5)
D. 스판의 可能性	94	24	14	132	①(31.5)
E. 商業性(아필 페숀性)	4	13	20	37	⑤(8.8)
F. 形狀(設計의 多樣性 등)	6	14	13	33	⑥(8.0)
G. 膜材가 가지는 透光性)	0	13	19	32	⑦(7.8)

* 價格이 比較的 싸고 大스판의 建物에의 要求度가 높다.

表4. 將來의 膜構造建築物의 利用度 期待値

用途別設問	1位	2位	3位	合計得點	利用順位등(總得點422에 대하여)
A. 公益施設(公會堂·公民館·集會場)	0	6	7	13	⑦ 3.8%
B. 스포츠施設(野球·테니스·스케이트·水泳場 등)	100	22	11	133	① 31.5
C. 商業施設(商店舖·바자會場, 쇼핑센터)	15	30	35	80	② 19.0
D. 文化施設(展覽會場·音樂堂·劇場·사카스)	8	35	34	77	③ 18.2
E. 屋外施設(公園쉘터·通路 등)	10	26	20	56	④ 13.2
F. 交通施設(驛舍·버스터미날·空港터미날)	1	8	8	17	⑥ 4.0
G. 通信施設(레이더 돔·實驗棟 등)	0	3	3	6	⑩ —
H. 플랜트施設(工場·處理場·作業場 등)	0	1	5	6	
I. 貯藏施設(倉庫·탱크·사이도 등)	4	4	10	18	⑤ 4.2
J. 港灣施設(오일 펀스·汚濁防止膜 등)	1	3	5	9	⑧
K. 土木的施設(小規模댐·工事用上屋)	2	3	2	7	⑨
L. 居住施設(住宅·別莊 등)	0	0	0	0	⑪ —

* 스포츠施設, 商業施設, 屋外施設에의 採用希望이 많다. 특히 冬期에 降雪이 많은 東京以北의 地區의 要求가 많다.

解決해야 할 問題는 많이 있으나, 가까운 將來에는 要求가 많은 東北, 北海道地方에도 膜構造의 可能性은 큰 것으로 想定하고 있다. 現在 北海道에서는 體育施設, 푸울, 商業施設이 각각 1施設 竣工했을 뿐이다. 參考로 이러한 施設의 冬期 最低外氣溫度는 −10~−30℃ 程度이다.

4. 하이라이즈形 에어돔 實施例

膜構造物로서의 에어돔의 溫熱環境에 관해서는 硏究論文, 「EXPO '88 靑函博 에어돔에서의 溫熱環境에 관한 硏究(其1)~(其3)」을 參考하기 바라며, 本稿에서는 設備計劃 및 設計手法에 관해서 解說한다.

이 에어돔(그림3~5)은 本州 靑森縣과 北海道를 地下터널로서 連結하는 世界最長의 海底터널 靑函터널開通을 記念해서, 本州側 靑森市와 北海道側 函館市의 兩側에서 開催된 地方博覽會이며, 靑森側會場의 開期중의 入場者는 豫定數보다 約 5萬人을 上廻하는 125萬人이었다. 會場은 靑森港의 一部를 利用하여 그 속에 있는 靑森果物產館을 中心으로 테마館으로서의 에어돔 其他 施設로서 構成되여 있다. 이 테마館의 에어돔은 最大幅 70m, 中心길이 204m, 最大高 19.5m(높이가 20m를 넘으면 避雷針이 必要하게 된다), 床面積 10,365m², 空間面積 107,956m³, 膜은 白色鹽化비닐製이며, 日射透過率은 10%이다. 居住域은 床上 3m까지로 하여 이 空間은 冷房을 하며, 3m 以上의 空間은 될때로 놔두기로 하였다. 開期는 1988年 7月9日부터 9月18日까지의 約 2個月間이며, 一般 博覽會가 6個月 程度임을 考慮하면 開催期間이 比較的 짧다. 그래서 暖房設備는 設置하지 않았다. 그리고 冷房피크負荷는 125kcal/m²h이다. 空調設備에 관해서는 加壓設備(그림3), 冷房設備(그림4)의 둘로 나누어서 解說한다. 또 에어돔의 立面圖를 그림5 加壓裝置의 詳細圖 및 送風機 周圍의 댐퍼制御計裝圖를 그림 6, 7에 表示한다.

加壓送風機機械室은 에어돔 北東側의 上部에, 別棟으로 單獨으로 設置하고 그 속에 F-1~F-4의 4대의 送風機(2대는 非常用電源有)

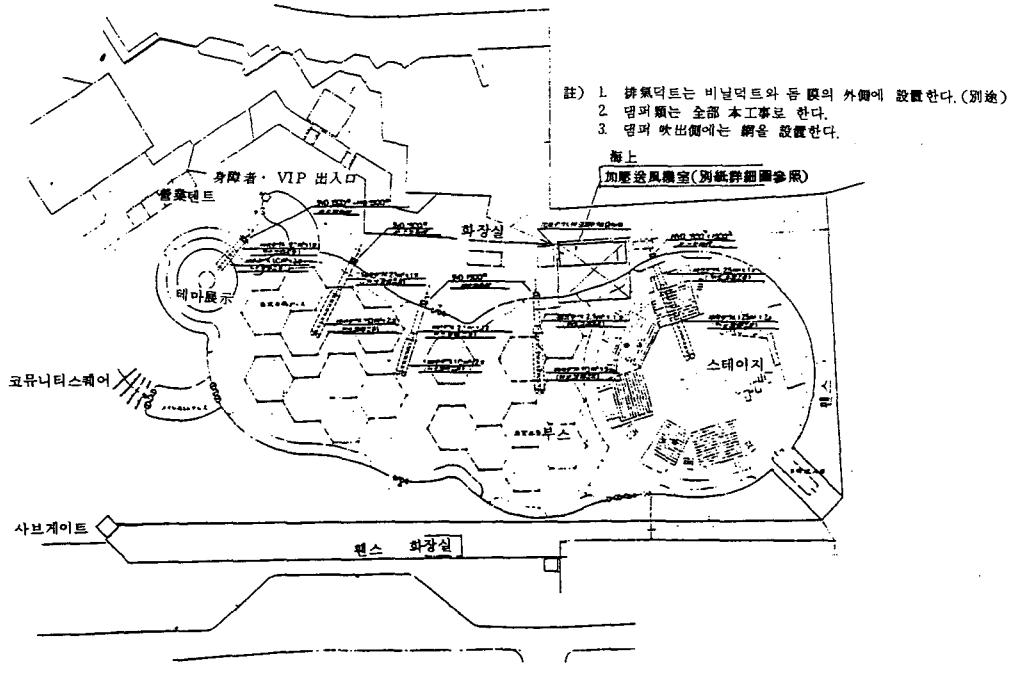


그림3. 加壓裝置 平面圖

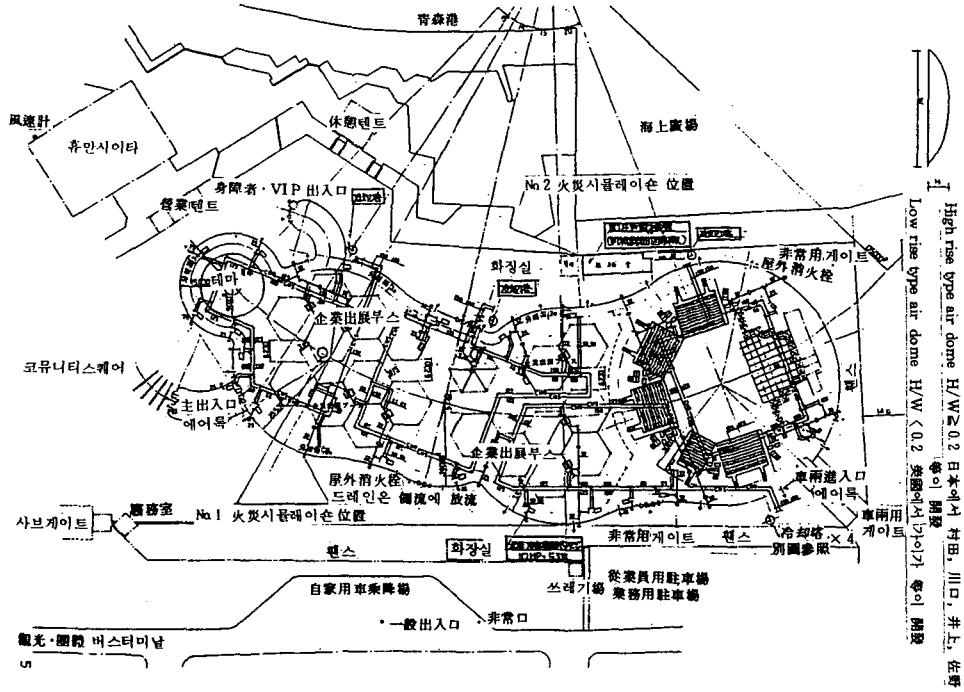


그림4. 冷房設備 平面圖

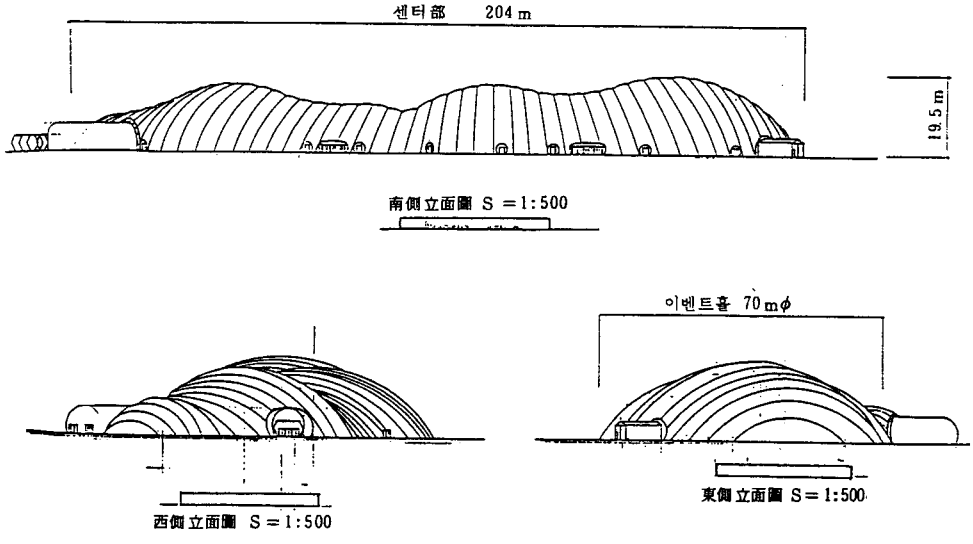


그림5. 에어돔 立面圖

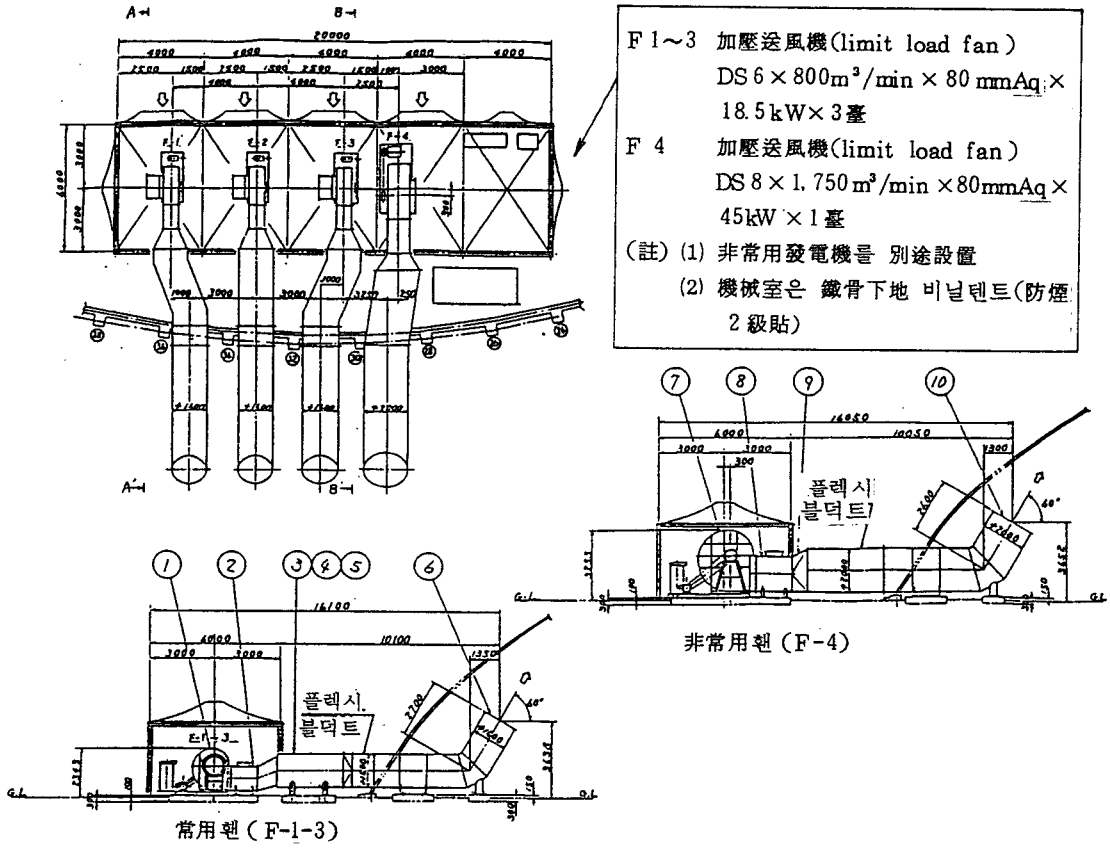


그림6. 加壓送風機室 詳細圖

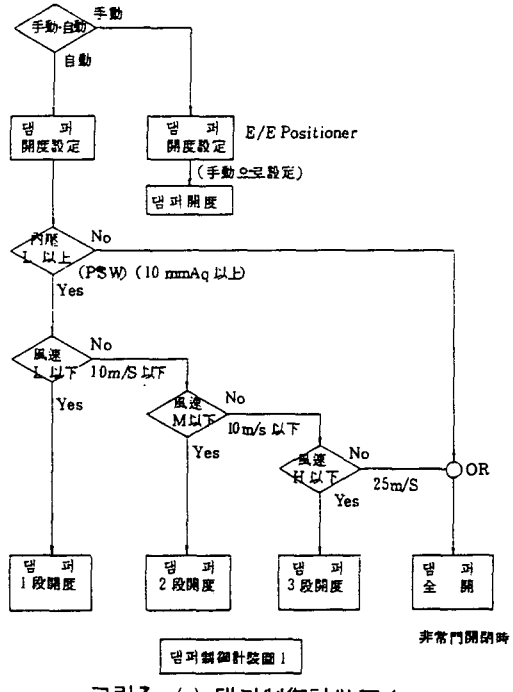


그림7. (a) 댐퍼制御計裝圖 1

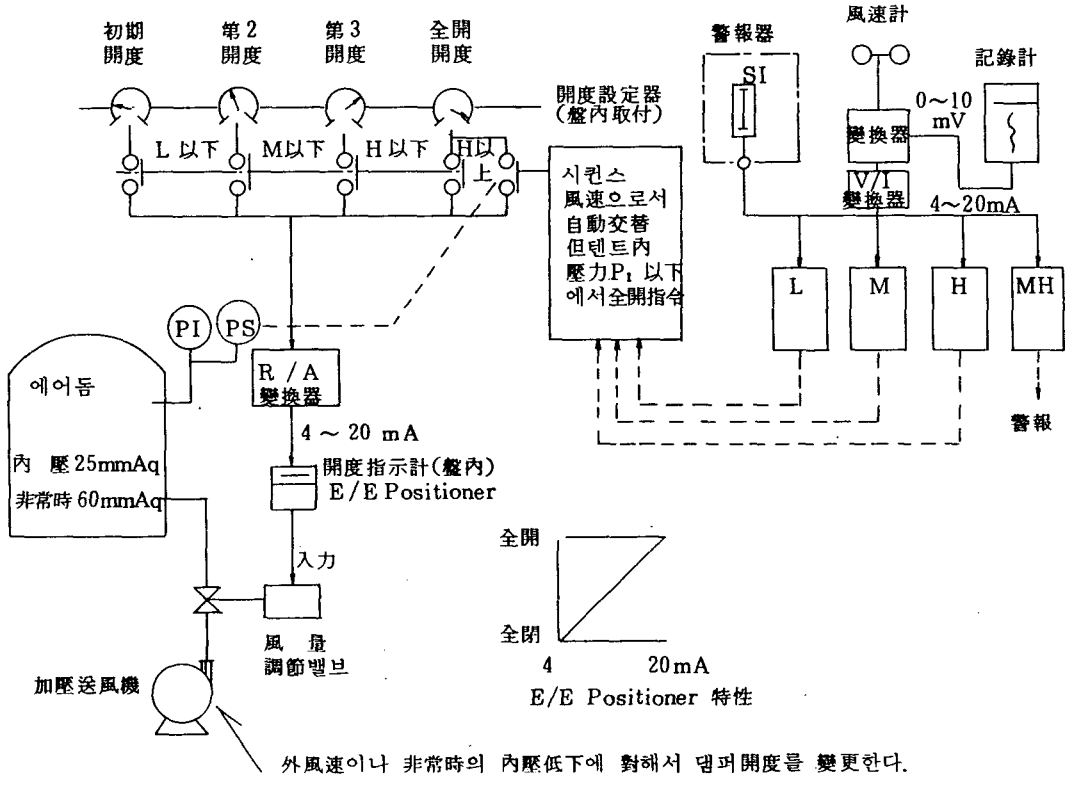


그림7. (b) 댐퍼制御計裝圖 2

를 設置하고, 常時 에어돔內의 漏氣量과 在室者에 대한 新鮮空氣供給을 위해서 給氣를 하고 있다. 에어돔의 內壓은 常時 25mmAq, 强風時 등의 非常時는 50mmAq로 하며, 外風 등으로 因하는 에어돔頂部의 膜變位量이 許容値인 1m 以下로 되게끔 內壓을 올린다. 또 全送風機의 送風量合計는 30分 程度로서 全送風이 可能한 容量으로 하며, 膜과 出入口의 漏氣量, 在室者에 대한 新鮮空氣의 供給量, 强風時의 內壓上昇, 膜에 구멍이 생겼을 때의 緊急運轉 등을 考慮해서 그림6에 表示하는 能力의 送風機를 4대로 分割해서 設置하였다. 非常時에 非常門을 開放했을 때와 膜에 구멍이 생겼을 때 膜의 平均荷重이 2.4kg/m²(膜의 自重)이므로 內壓이 2.4mmAq 以上이면 膜은 降下하지 않고 그 形態를 維持하는 狀態로 되어 있다.

加壓送風機의 運轉은 常時 1대 또는 2대로 하였다. 在室者數는 돔 內側의 展示스페이스가 2,800人, 右側의 이벤트廣場이 700人, 計 3,500人(最大)의 觀客이 在室하는 것으로 計劃하였다. 1人當 必要外氣量을 20m³/h 로 하고, 合計 70,000m³/h의 外氣가 常時 供給되게끔 F-1～F-3의 送風機중 2대를 運轉키로 하였다. 단, 入場者數가 적은 時間帶는 1대 運轉으로 하였다.

給氣方法은 그림6에 表示되는 바와 같이 加壓送風機로부터 膜面에 따라서 上部空間으로 吹出하였다. 排氣는 膜과 膜 基礎콘크리트의 接續面, 出入口 등으로부터의 漏氣에 의한 것과, 돔 頂上部 5個所로부터의 排氣로서 處理하였다. 돔 頂上部는 熱이 고이게 되므로 頂部의 排氣는 有效하다. 參考로 漏氣量은 內壓에 따라서 變化하는데, 換氣回數로서 0.3～0.7回/h 程度이다.

冷房에 관해서는 室內床上 3m 程度까지를 冷房존으로 하고, 이 空間을 28℃ 以下로 維持하게끔 計劃하였다. 熱負荷가 적은 時間帶는 26℃ 程度로 되게끔 制御하였다. 冷房은 室內에 10HP의 水冷式팩키지를 55대 分散

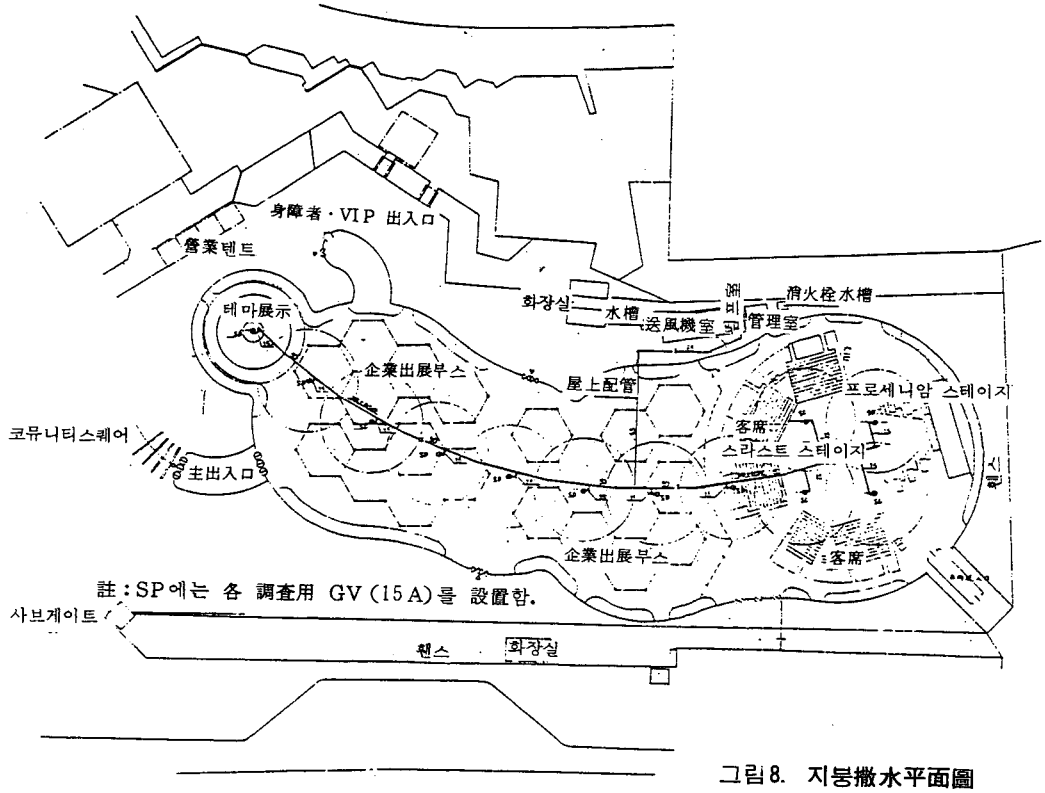


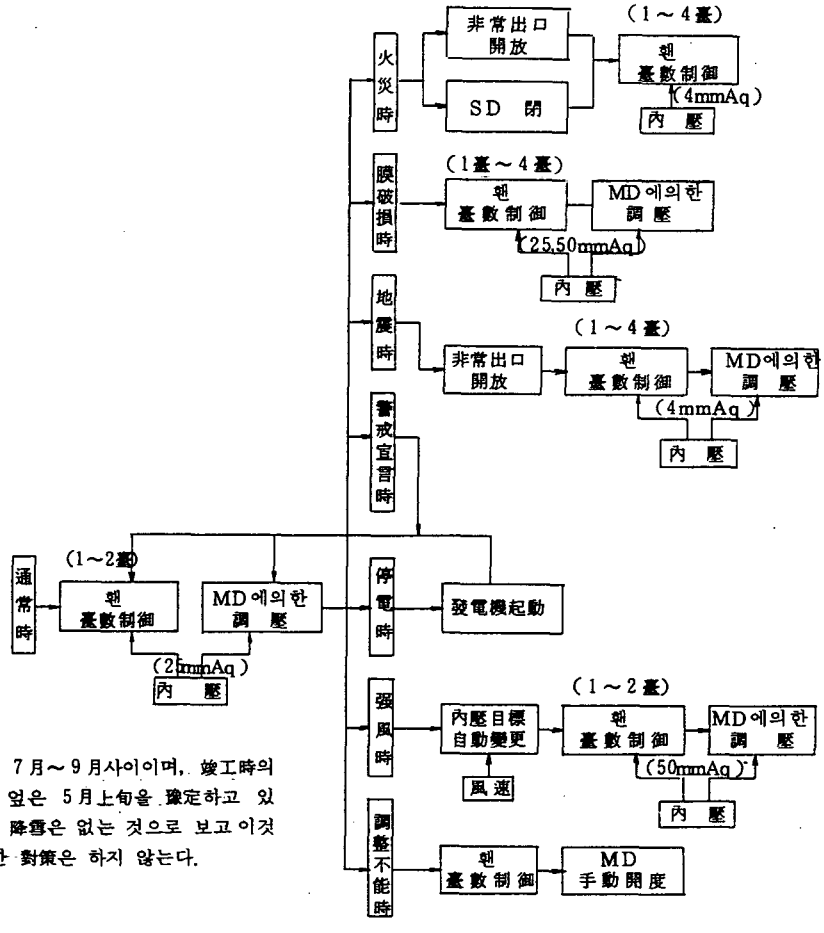
그림8. 지붕撒水平面圖

配置하여 冷房하였다. 冷房하는 空間이 대단히 크고, 각 時間帶에 따라서 方位別, 單位面積當 冷房負荷가 다름으로 方位別 部分空調도 可能하다. 또 그림8에 表示하는 바와 같이 晴天時로서 冷房負荷가 큰 日中은 지붕 撒水를 하여 에어돔 頂部附近에서 蒸發冷却을 하여 膜表面부터 床面으로 反射하는 冷房負荷를 輕減하게끔 計劃하였다. 撒水裝置는 回轉式農業用 스프링클러를 使用하고, 1個의 스프링클러헤드에서 直徑 25m를 담당하고, 1個當의 撒水量은 11.7ℓ/min, 水壓은 1.5kg/cm², 撒水角은 7°이다.

消火設備는 法的으로는 스프링클러가 必要하나, 空間이 너무 크고, 天井이 너무 높고, 膜構造이므로 設置가 不可能하다는 理由 등으로 屋外消火栓을 設置해서 對備하였다.

5. 膜構造建築物의 防災評定

非常時에 돔內의 觀客이 安全하게 屋外로 避難할 수 있게 할 目的으로 防災評定을 받는다. 2,000m² 以上의 膜構造建築物은 日本建築센터評定部防災課의 評定을 받어, 이것에 合格되어야 한다. 그림9에 非常時의 制御項目(그림10에 에어돔이 디프레숀되지 않기 위한 內壓制御와 送風機運轉 대수의 制御 다이아그램을 表示한 것이다. 非常時의 制御項目은 冬期에도 使用하는 에어돔은 그림9 以外에 降雪時와 積雪時의 制御가 必要하게 되는데 本 에어돔은 建設時가 5月 중순이고, 開催가 7月~9月의 夏期間이므로 그러한 降雪에 대한 項은 除外하였다.



註) 1. 會期가 7月~9月사이이며, 竣工時의 불로우 업은 5月上旬을 豫定하고 있으므로 降雪은 없는 것으로 보고 이것에 대한 對策은 하지 않는다.

그림9. 加壓送風시스템

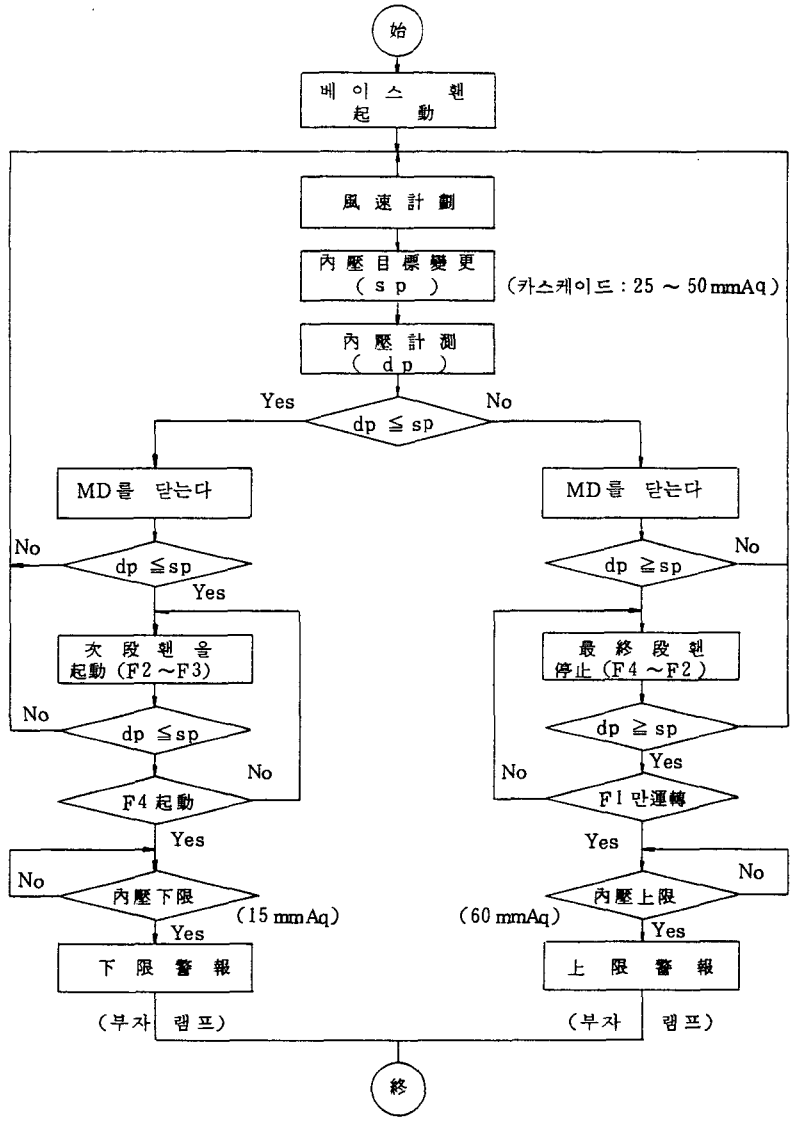


그림 10. 內壓制御시스템

評點主要項目은

1) 火災時의 排煙 또는 蓄煙
2) 돔의 內壓과 送風機의 性能
3) 在室者에 대한 新鮮空氣確保
4) 非常時에 避難口를 開放했을 때의 初期風壓에 대해서 그 加壓送風시스템과 內壓制御시스템을 그림 9, 10에 表示한다.

이러한 制御項目중에서 가장 問題로 되는 것은, 火災發生時에 場內의 觀客이 安全하게 屋外로 避難할 수 있게 하는 對策이다. 그림 11~18에 火災에 대한 檢討結果를 表示한다.

火災는 그림 4의 No.1, No.2의 火災시뮬레이션位置의 어딘가에 發生한 것으로 하여 檢討하였다. No.2는 돔 中心部에서 煙氣만이 發生하고 火源으로서 膜面에 구멍이 뚫렸을 때의 시뮬레이숀이다. 火源의 發熱速度를 300 kcal/m²·sec로 했을 때의 火源이 타번지는 面積과 火源의 發熱速度가 그림 11, 12이다. 그림 13~15는 No.2에서 火災가 發生하였을 때의 시뮬레이숀 結果를 表示하는 것이며, 그림 13은 火源과 膜 지붕의 位置關係, 그림 14는

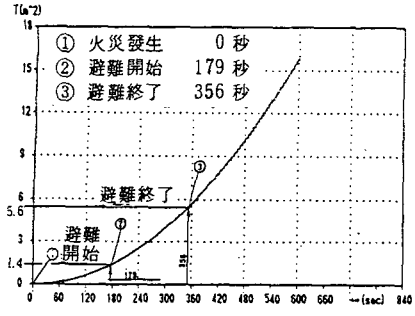
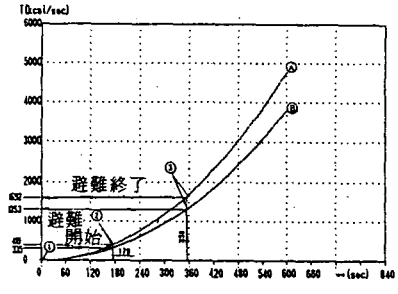


그림 11. 火源이 타 번지는 面積(m^2)



Ⓐ 火源의 發熱速度 qF (kcal/sec·m^2) 100 %
Ⓑ 煙層蓄熱量 qFS (kcal/sec·m^2) 80 %
① 火災發生 0 秒
② 避難開始 179 秒
③ 避難終了 356 秒

그림 12. 火源의 發熱速度(kcal/sec)

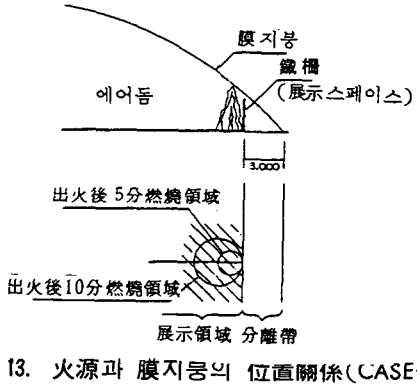


그림 13. 火源과 膜지붕의 位置關係(CASE-2)

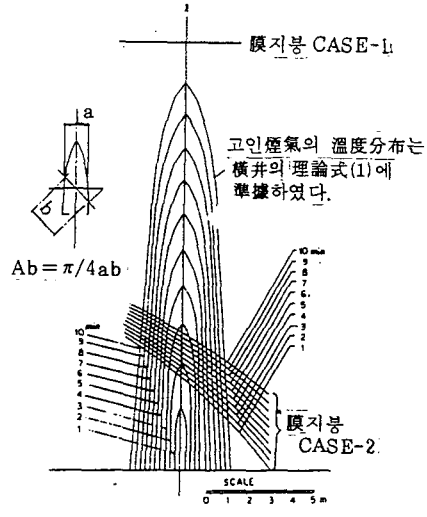


그림 14. 고인 煙氣溫度 200℃ 以上으로 되는 領域과 膜지붕의 位置

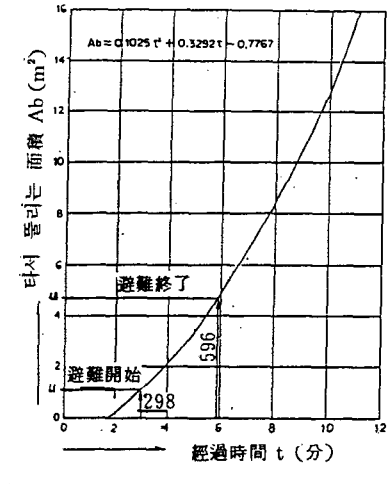


그림 15. 타서 뚫리는 面積과 經過時間의 關係

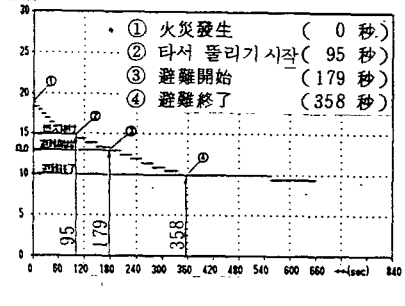


그림 16. CASE-2 : 煙氣의 下端高(AM-SM-7)

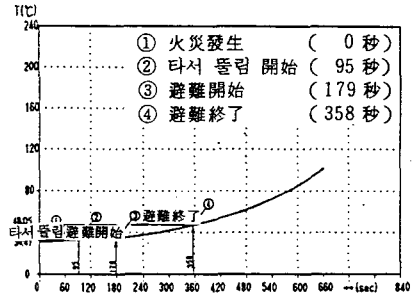


그림 17. CASE-2 :煙氣의 平均溫度(AM-SM-7)

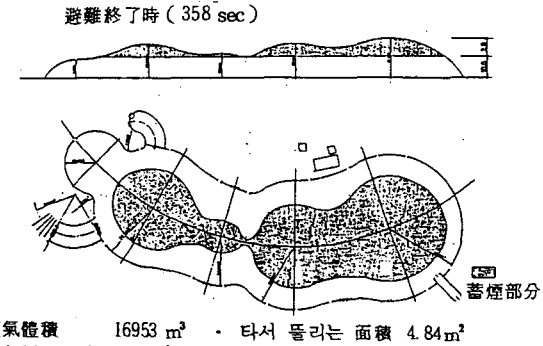


그림 18. 火災發生 以後의 煙氣發生

火災로서 膜에 구멍이 뚫리는 面積을 計算한 것이며, 그 結果를 그림 15에 表示하였다. 그림 16은 No.2의 火災시뮬레이숀에서의 煙氣의 下端을 表示하며, 火災發生後 避難完了時點에도 床面부터 10m 높이 部分에는 煙氣는 오지 않는다. 즉 에어돔頂部 19.5mh부터 10mh 部分에 蓄煙되어 있음을 表示한다. 그림 18이 避難完了時의 蓄煙量의 시뮬레이숀結果이다. 그림에는 省略하였는데, No.1의 點에서 火災가 發生하였을 때는 膜表面이 타지 않고 구멍이 나지 않으므로 돔內에 남는 蓄煙量이 많게 되며 避難完了時의 煙氣下端은 床面부터 9.5mh로 된다. 돔內의 空間容積이 크므로 No.2의 경우와 비교해서 煙氣의 下端이 50cm程度의 差 밖에 생기지 않는다. 日本에서는 蓄煙方式일 때 床面에서부터 煙氣의 下端까지의 높이는 最少 3m 程度가 要求되고 있다. 또 蓄煙했을 때의 平均溫度의 시뮬레이숀 結果를 그림17에 表示한다. 火災開始時 34.47℃, 避難終了時는 48.05℃로 되고, 膜面에 구멍이 뚫리는 溫度를 200℃로 한다면 膜面에 대해서는 전연 問題가 없는 溫度이다. 단, 晴天時로서 外氣溫度 28.0℃의 狀態에서 火災가 發生한 것으로 假定하였다.

參 考 文 獻

1. 膜構造—その現狀と展望—, (社)日本膜構造協會.
2. 靑函トンネル開通記念博覽會テーマ館設計圖書.