

非收縮性 시멘트의 레올로지

李 承 燮(譯)
 〈韓國洋灰工業協會 技術課 代理〉

1. 序 論

세계적으로 널리 생산되고 있는 非收縮性(Non Shrinking)시멘트 또는 膨脹(Expansive)시멘트의 대부분은 포틀랜드시멘트에 $3\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$ ($\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$)化合物과 石膏의 첨가를 基礎로 한 것이다. 이 化合物은 보오크사이트, 石灰石, 石膏의 혼합물을 $1,300 \sim 1,350^\circ\text{C}$ 의 로타리키른에서 燒成시킴으로써 얻을 수 있다. 여기에 石膏가 부여된 化合物의 水和反應에는 시멘트페이스트의 膨脹을 수반하며 에트링가이트($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\bar{\text{C}}\bar{\text{S}} \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)가 生成하게 된다. 석고의 첨가량은 에트링가이트로서의 알루미늄과의 결합을 최대한 強化시킬 수 있도록 選擇되어야 한다. 非收縮性 시멘트를 얻기 위해서는 대체로 3~5%의 $\text{C}_4\text{A}_3\bar{\text{S}}$ 를 첨가하게 되는데 5~10%까지 첨가량을 높이면 膨脹시멘트가 만들어지게 된다.^{1)~2)} 이러한 시멘트들은 ASTM C 845-80의 Type K로 規定되어 있다.

이 分野에 대한 연구는 폴란드에서 깊이 다루고 있으며 Cracow 建築材料研究所³⁾와 Kielce 工大 技術研究所⁴⁾에서는 膨脹크링카와 非收縮性시멘트의 製造에 관한 연구를 계속하고 있다. 非收縮性시멘트는 收縮龜裂을 防止하기 위한 콘크리트의 製造에 사용되는데 近年에 東유럽, 蘇聯, 日本, 中共 등에서 그 重要性이 점차 浮刻되고 있는 것은 페이스트의 流動學이 시멘트 物

質의 성공적인 利用과 밀접한 관계가 있기 때문이다.

非收縮性시멘트의 流動性은 분명히 보통포틀랜드시멘트와 類似하게 나타나지만 많은 量의 에트링가이트가 急速하게 形成됨으로써 페이스트內的 既存構造에 영향을 미치게 된다. 本稿에서의 流動性에 대한 연구는 非收縮性시멘트(Non Shrinking Cement : NSC)와 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement : OPC)의 페이스트로 遂行된 것이며 化學的 結合水量으로 連結된 페이스트構造의 變化는 TGA로 관찰된 것이다.

2. 實驗順序

1) 材 料

非收縮性시멘트(NSC)는 포틀랜드시멘트크링카 75%, 膨脹크링카 15% 그리고 石膏 10%의 混合物로써 實驗的으로 調製된 것이며 이중 膨脹크링카는 石灰, 石膏 및 알루미늄아 함량이 높은(32~36%) 플라이애쉬로 製成된 것이다. 두가지 시멘트의 特性은 <表-1>에서 보는 바와 같다.

2) 粘性測定(Viscometry)

典型的인 順序로서 最適量의 물을 賦與하기 위해 처음 30초간은 조금씩 注入한 후 이것을

시멘트의 物性

<表-1>

	NSC		OPC
	포틀랜드 크링카	膨脹 크링카	
化學成分(%)			
SiO ₂	21.2	24.0	18.8
Fe ₂ O ₃	3.7	4.0	3.0
Al ₂ O ₃	5.3	8.5	4.5
CaO	67.0	56.0	60.2
MgO	1.5	-	0.8
SO ₃	0.5	3.0	2.4
Na ₂ O	0.11	0.2	0.07
K ₂ O	0.61	1.4	0.52
物理性能			
初 結 (分)	105	90	
終 結 (分)	170	435	
比表面積(Blaine) (m ² /kg)	335	272	
7日 膨脹率(%)	0.5	0	
壓縮強度(MPa) ¹⁾			
3日	16.3	18.4	
7日	20.0	24.8	
28日	35.6	36.4	

註: 1) 몰드 40×40×80mm, w/c=0.5, s/c=3, 시험방법: 플랜트규격 PN-80/B-04300

實驗用 믹서에 넣어 500 rpm 으로 예정된 시간 동안 혼합한 다음 혼합된 페이스트를 粘度計의 실린더 외벽에 부착시킨다. 모든 혼합물은 20℃에서 準備, 試驗하였다.

流動性的 測定은 본 실험을 위해 특별히 設計된 두개의 同軸실린더가 달린 Rheotest-2 粘度計(VEB MLW)를 사용한 즉 (1) 실린더 內徑 18.8mm, 外徑 20mm, 시료높이 72mm의 S-S2 시스템과, (2) 실린더 內徑 16.2mm, 外徑 20mm, 시료높이 72mm인 S-S3 시스템으로 되어 있으며, 실린더 側面은 0.5mm의 사각형 斷面을 가진 鐵線들이 0.5mm 간격으로 圓周上에 둘러싸여 있다. 어느 경우에 있어서도 하나의 履歷曲線 形態로서 완성된 流動曲線과 몇가지의 定常剪斷率을 얻기 위한 剪斷應力(變形力) 對 時間의 곡선 모두는 X-Y플로터에 기

록된다.

本節次上的 변화는 각 결과치 아래에 적절히 註記하였다.

3) 熱重量測定(Thermogravimetry: TG)

TGA는 600mg의 시료를 空氣中에서 10℃/分으로 加熱하여 사용하는 Paulik, Erdey의 微分熱重量測定法(DTG)으로 수행한바 시료를 코런덤(鋼玉)을 基準物質로 하여 並列分析한 것은 TG 曲線의 判讀性을 容易하게 하기 위한 것이다. 시료는 시험하기 전에 알고있는 바와 같이 에트링가이트가 脫水化하지 않을 정도인 70℃의 낮은 溫度에서 2시간 동안 乾燥시킨다. 그 다음에는 6분, 16분간 水和시킨 후 100~150℃의 溫度範圍에서 나타난 페이스트 시료의 重量減少를 토대로 하여 解析이 이루어지게 된다.

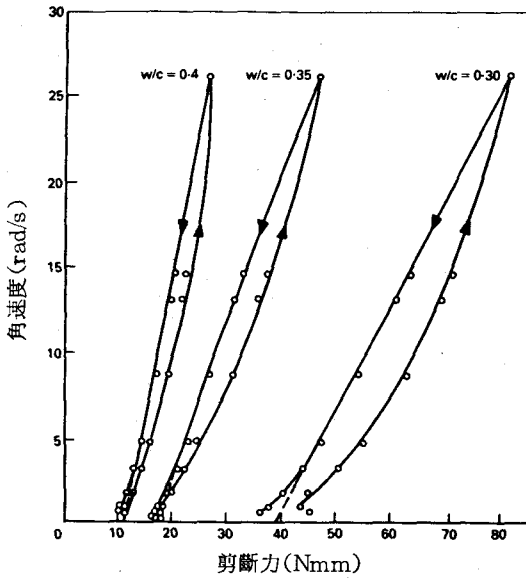
3. 實驗結果

1) 流動曲線의 形態에 미치는 循環時間의 영향

Banfill의 연구방법^{5)~6)}에 따라 0.30, 0.35 및 0.40의 w/c 비를 취한 NSC를 시멘트-물이 최초 접촉한지 5분후 剪斷(Shear)이 생기기 시작할 때 S-S2로 시험하였다. 全體循環時間은 2분~1시간까지 변화시켰으며 최대 回轉速度는 243rpm이다.

循環時間이 짧을 때(3~5분)에는 Type 1의 곡선은 構造의 降伏(破壞)現象이 나타남을 보여준다(<그림-1>). 이 중 보다 낮은 剪斷率에서는 플러그(Plug) 流動의 發生에도 불구하고 下降曲線에는 빙행(Bingham) 流體⁶⁾로서 Reiner-Rivlin 方程式에 의해 결정되는 降伏値와 塑性 粘度가 나타나고 있다.

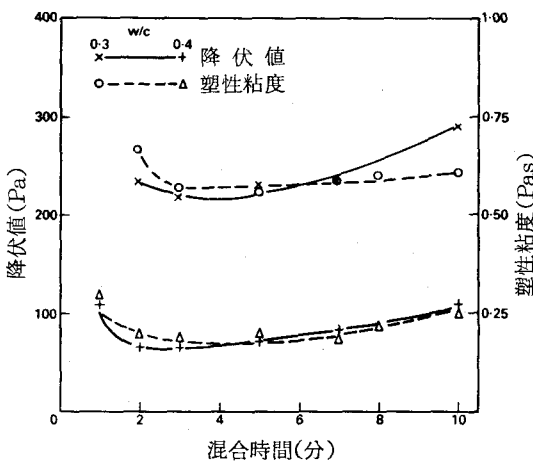
6~15분 정도의 循環時間에서는 Type 2의 곡선이 얻어지는데 여기서는 上昇曲線과 下降曲線이 交叉하며, 15분 이상의 더 오랜 循環時間에서는 Type 3의 곡선이 나타나게 되는데 시간이 지남에 따라 累積된 構造는 전적으로 剪斷에 의한 降伏過程이 支配的이다.



〈그림-1〉 여러가지 w/c 비에서의 NSC 페이스트의流動曲線(3分)

2) 混合時間의 영향

W/C비를 0.3과 0.4로 한 NSC 페이스트를 10분에 달하기까지 機械적으로 혼합한 후 S-S2로 시험하되 粘度計는 혼합이 끝난지 1분쯤 뒤에, 즉 시멘트와 물이 최초로 접촉하기 시작한지 11.5분 되는 時點에서부터 作動되도록 하였다. 最大回轉速度는 243rpm이며 循環時間은 3



〈그림-2〉 NSC 페이스트의 降伏値와 塑性粘度에 있어서 混合時間의 영향

분이다. 〈그림-2〉는 NSC의 流動特性에 미치는 混合時間의 영향을 나타낸다.

3) 페이스트 濃度의 영향

W/C비가 0.3~0.4인 NSC 페이스트를 機械적으로 3분간 혼합한 후 S-S2 및 S-S3로 시험한 바 最大回轉速度는 역시 243rpm, 循環時間은 3분으로 하였으며 混合時間은 最少의 降伏値와 塑性粘度를 나타내고 있는 2~5분인 〈그림-2〉의 결과를 適用, 選擇하였다. 물론 두 가지의 시험을 위해 페이스트 시료는 각각 분리하였다. 〈그림-3〉은 比較試驗을 위한 OPC 페이스트를 포함, w/c 비에 따른 降伏値와 塑性粘度의 變化를 나타낸다.

4) 時間(材令)의 영향

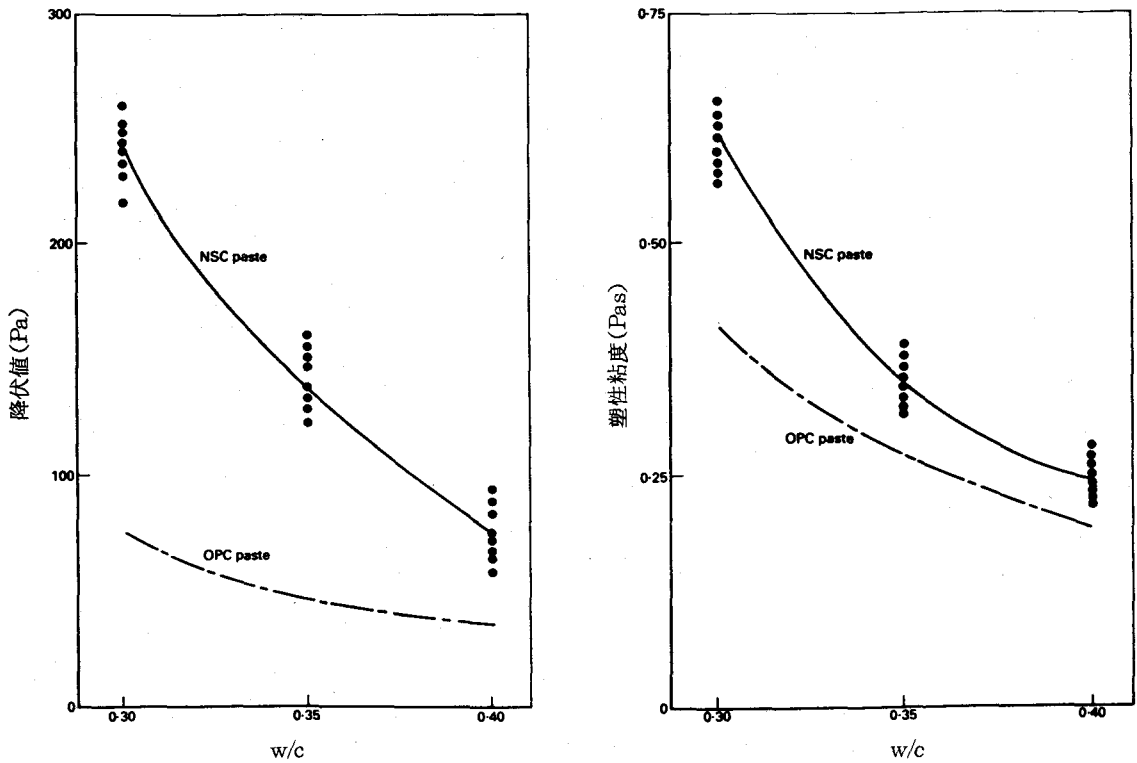
각각 0.35, 0.40의 w/c 비로 하여 3분간 機械적으로 혼합한 NSC 페이스트 시료를 S-S2 및 S-S3에서 시험하기 전 1시간까지 放置해 둔다. 또한 最大回轉速度는 243rpm, 循環時間은 3분이다. 〈그림-4〉는 時間에 따른 降伏値와 塑性粘度의 變化를 나타낸다.

5) 定常剪斷에 의한 構造의 降伏(破壞) 現象

역시 0.35 및 0.40의 w/c 비를 취하여 500rpm으로 機械적인 혼합을 거친 NSC 페이스트는 S-S2에서 最大値 437.4 S⁻¹까지, S-S3에서는 最大値 145.8 S⁻¹까지 몇가지 剪斷率로서의 變形이 일어난다. 이 결과치는 〈그림-5〉 및 〈表-2〉에 나타나 있다.

6) 熱重量測定曲線(TG-Curve)

모든 測定은 w/c 비를 0.4로 한 페이스트를 사용하여 그 첫번째 測定으로서 6분간 水和된 시료의 熱重量分析圖는 〈그림-6〉과 같다. 100~500℃ 溫度範圍에서의 重量減少가 TG曲線에 나타난 바와 같이 이것은 에트링가이트內的 化學的 結合水の 移脫을 가리킨다. 그러나 OPC 등 그밖의 水和生成物은 그 水和期間이 짧기 때문에 단지 약하게 나타나고 있다. 두번째 測定은 16분간 水和된 시료를 粘度計에 의한 437.4 S⁻¹



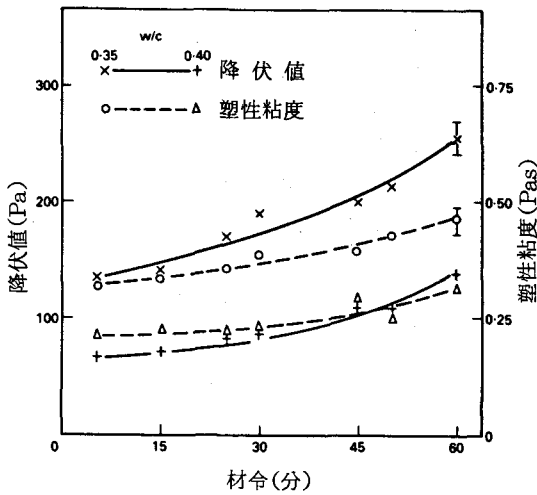
〈그림-3〉 w/c 비에 대한 NSC 및 OPC 페이스트의 流動學的 特性

S-S 2 및 S-S 3 에 의해 나타난 定常剪斷下의 構造破壞

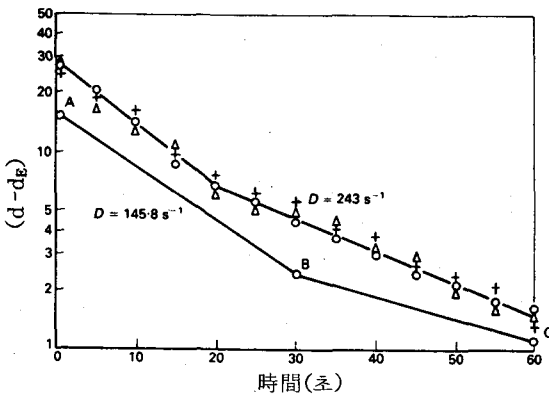
〈表-2〉

w/c	實驗 條件		Torque (Nmm)			時間 (sec)		기 울 기	
	실 린 더	剪 斷 率 D(s ⁻¹)	A	B	C	A→B	A→C	AB	BC
0.35	S-S2	81.0	33.7	-	28.5	-	110	*	2.46
0.35	S-S2	121.5	54.2	47.6	45.9	40	180	3.97	2.74
0.35	S-S2	145.8	61.3	50.9	48.1	30	150	5.17	2.89
0.35	S-S2	218.7	77.6	62.5	58.3	25	120	6.03	3.31
0.35	S-S2	243.0	89.7	70.7	64.4	20	80	6.94	4.05
0.40	S-S2	145.8	18.6	-	17.1	-	20	*	1.56
0.40	S-S2	243.0	19.9	19.0	18.0	10	50	6.42	3.22
0.40	S-S2	437.4	27.6	25.6	21.0	5	150	7.15	2.16
0.35	S-S3	27.0	25.6	-	20.9	-	70	*	3.90
0.35	S-S3	81.0	39.7	-	29.1	-	90	*	3.34
0.35	S-S3	145.8	65.9	60.6	53.8	10	140	5.00	2.94

註 : * 實驗에 나타나지 않았음.



〈그림-4〉 材令에 대한 NSC 페이스트의 流動學的 特性



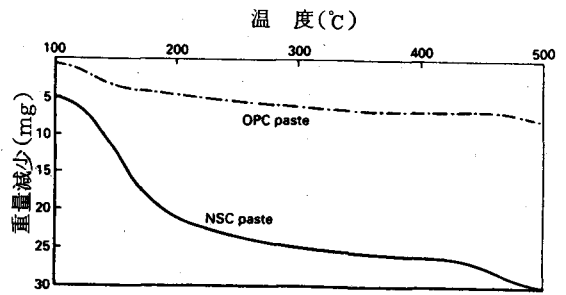
〈그림-5〉 두가지 剪斷率로서 S-S2에 의해 나타난 w/c 0.35에서의 NSC에 대한 카로그 降伏曲線 (3회 반복실험)

의 一定한 剪斷率로서 10분간 剪斷된 것을 測定한 것이다. 그 TG曲線은 〈그림-7〉과 같다.

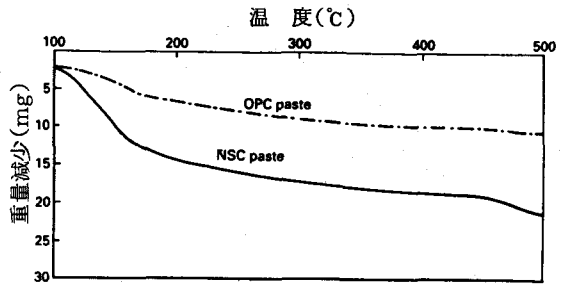
4. 考 察

流動學的 研究를 위해 사용된 시멘트의 特性을 比較함에 있어서(〈表-1〉), NSC는 OPC에 비해 比表面積이 더 크고, 終結時間이 매우 짧다는 點을 注目해야 한다.

1) 流動曲線



〈그림-6〉 6분간 水和된 w/c 0.4의 페이스트에 대한 TG曲線



〈그림-7〉 $437.4 S^{-1}$ 에서 10분간 剪斷後 다시 6분간 水和시킨 w/c 0.4의 페이스트에 대한 TG曲線

3~5분의 짧은 循環時間에서의 流動曲線(〈그림-1〉)에서는 剪斷率이 증가(剪斷이 얇아짐)함에 따라 걸보기粘度가 감소됨이 觀察되었다. 下降曲線은 낮은 剪斷率에서의 定規曲率을 가지는 線型으로서 降伏値와 塑性粘度를 決定지을 수 있는, Reiner-Rivlin 方程式에 의한 Bingham 流體로 생각된다. 그리고 循環時間을 증가함에 따라 얻어진 Type 1, 2, 3과 같은 流動曲線 形態의 점진적인 변화는 OPC와 同一하게 나타난다.⁵⁾

OPC 페이스트와는 對照的으로⁶⁾ NSC 페이스트의 降伏値와 塑性粘度는 혼합시간을 延長시킬수록 증가하게 되는데(〈그림-2〉) 그 最少値는 混合시간이 약 3분에 달했을 때이며 이후의 降伏値는 塑性粘度보다 급히 증가하고 있다. 이러한 現象은 실제로 콘크리트의 混合시간이 길어질 때 일어나는 결과로서 肉眼으로도 알 수 있는 워커빌리티의 損失과 膨脹性的 減少를 초래하게 된다.⁸⁾ 즉 이렇게 混合을 계속하게 되면 에트링가이트의 生成을 促進시키며 그의 높은

比表面積으로 인해 페이스트가 硬化하게 되는 것이다. 그러나 이러한 初期生成은 이후에 膨脹을 受容할 수 있는 可塑性의 매트릭스 내에서 일어나며, 하나의 固定된 매트릭스내에서의 正常的인 에트링가이트의 生成은 이미 設計된 시스템의 膨脹으로 歸着된다.

〈그림-3〉은 同一한 定性分析에 의한 여러가지 w/c 比에서의 NSC와 OPC 페이스트의 流動學的 媒介變數를 나타낸다. 그러나 여기서 降伏値와 塑性粘度는 OPC보다 NSC가 높게 나타나 있다. 이는 比表面積이 비교적 크고(〈表-1〉), 혼합직후 최초 몇 분 동안 에트링가이트의 生成量이 部分的으로 증가되었기 때문인 것으로 생각된다(〈그림-6〉). 만일 이러한 差異가 이들 시멘트를 이용함에 있어서 實際的인 重要性이 될만큼 충분히 크다면 非收縮性시멘트 콘크리트에는 可塑劑(減水劑)를 사용해야 하거나 또는 더 많은 混合水가 필요하게 될 수도 있다. 〈그림-4〉는 계속적인 에트링가이트의 生成으로 인해 材齡이 길어짐에 따라 降伏値와 塑性粘度 또한 점진적으로 증가되고 있음을 說明해 주고 있다.

2) 構造의 變化—流動學的 分析資料

Type 1 流動曲線에서 混合時間 약 3분까지 降伏値와 塑性粘度가 점차 낮아지는 것은 NSC 페이스트가 OPC 페이스트와 비슷한 内部構造를 가지고 있음을 가리킨다. 이것은 일정한 定常剪斷率에서의 現象에 대한 一般的인 形態로서 이미 確認된 것이며 回轉실린더에서의 토오크(Torque : 剪斷力)는 시간이 지남에 따라 減少하게 된다.

OPC 페이스트에서의 現象과는 對照的으로 주요 構造의 變化는 몇 분 내에 이루어지는 바 NSC 페이스트에 관해 賦與된 모든 實驗에서 降伏(破壞)現象이 나타나지만 페이스트가 硬化되는 理由로서 에트링가이트의 生成이 계속되던 전인 비교적 짧은 시간내에 이루어지는 것이 보통이다. 初期값(A)에서 平衡값(C)에 이르기까지의 토오크의 減少(〈表-2〉)는 正常的으로 관찰된 OPC 페이스트에서 90%까지의 감소에 비한다면 아주 작은 것이다.⁶⁾

時間에 따른 剪斷應力의 變化는 네부분의 固有한 領域을 보이고 있다.

- ① 剪斷의 처음 수십초간에 있어서, 應力은 急激히 감소된다(〈그림-5〉의 AB 區間).
- ② 實驗條件에 따라 약간의 差異는 있겠지만 다음의 몇 분간은 다소 緩和된다(〈그림-5〉의 BC 區間).
- ③ C점 부근의 應力은 最少가 되며 剪斷에 의한 構造破壞는 時間에 의한 構造累積으로 平衡狀態에 달하게 된다.
- ④ 應力の 增加는 剪斷 6분 뒤에 일어나는 水和反應의 活性化에 의한 것이다.

剪斷應力이 감소되는 領域 ①과 ②에 있어서 回轉실린더에서 測定된 시간 t에서의 토오크를 T라 할 때 Tattersall⁷⁾에 의해 提示된 指數關係式에 의하면 다음과 같이 表現할 수 있다.

$$T = T_B + (T_0 - T_B) \exp(-Bt)$$

여기서 T_0 는 토오크의 初期값이며 T_B 는 平衡값, B는 대부분은 剪斷率에 의한 것이지만 實驗條件에 의한 常數이며, 이것을 t에 대해 $\log(d - d_B)$ 로 플롯한 形態로서 〈그림-5〉에 나타났다. 여기서 d는 토오크를 읽기 위한 粘度計의 자눈이다. 區分된 두 개의 直線 AB 및 BC는 降伏曲線과 附屬되며 그 기울기와 交叉點의 時間을 〈表-2〉에 要約하였다.

各組에서 가장 낮은 剪斷率을 가진 直線 하나만으로도 그의 舉動을 설명하는데 충분하나 뜻밖에도 資料 全體를 알아보기 위해서는 두 개의 直線이 필요하다. OPC 페이스트를 연구하던 중 Tattersall과 Dimond¹⁰⁾는 매끄러운 실린더는 두 개의 直線과 그 交叉點을 만든다는 것을 발견하였는데 이는 실린더 외벽에 接한 페이스트를 固着시키는 플러그의 崩壞를 가리킨다. 반면에 그들은 결코 여기서 사용했던 것과 類似한 톱니모양의 실린더로는 실험하지 않았기 때문에 그것이 두 개의 直線을 이용하는데 필요하다는 것을 알고 있을 것이다. 安定된 플러그 形態를 이루면 시료는 실험이 끝난 뒤에도 고스란히 남아있는 것처럼 보인다.

本 實驗에서 플러그는 오직 S-S3의 경우에서만 관찰된 바 실린더 외벽에 接한 약 1mm

두께의 페이스트 固着帶는 실험이 끝난 뒤에도 그대로 남아 있었다. 이것은 剪斷應力이 갈라진 겹을 가로질러 減少하게 되어 시료의 降伏値가 실린더 외벽에 도달하기도 전에 아래로 떨어져 버리기 때문에 이러한 形態를 이루게 되는 것이다. 同一한 剪斷率에서의 計器의 눈금과 回轉速度로부터 계산된 토오르크는 S-S2 보다 S-S3에서 더 높게 나타나며 이를 半로그로 플롯하여 보면 차이가 더욱 커진다는 점을 <表-2>에서 注目해야 할 것이다. 이것은 S-S3에서의 플러그에 의해 야기된 有效間隙幅의 縮少로서 剪斷試料에 어느 정도는 計器 눈금으로 계산된 값보다 더 높은 有效剪斷率을 賦與할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 理由에서 두 개의 交叉되는 直線을 그려 보아야 할 必要性이 있는 것이며, 플러그流動의 발생과는 無關하다는 것을 알 수 있다.

또한 構造의 降伏現象을 고려해 볼 때 설명되어야 할 부분은 NSC 페이스트는 粘度計로 이동하기 전에 이미 剪斷받았다는 점이다. 同一한 剪斷條件下에서의 OPC 페이스트에는 별다른 降伏現象이 나타나지 않는다. 이것은 機械的 混合節次上에는 剪斷되지 않은 시멘트페이스트에 존재하는 凝集構造를 이겨낼 수 있는 충분히 높은 에너지가 入力되어 있다는 것을 가리킨다. 殘留構造의 降伏現象은 몇가지 다른 現象에 의한 것이다. TG 分析資料는 이것이 에트링가이트로부터 물의 移脫에 의한 것임을 暗示하고 있다.

3) 構造의 變化 - TG 分析資料

本稿에 記述된 연구는 처음으로 非收縮性 시멘트의 流動學的인 측면과 分析學的인 측면에서 서로 결합시켜 시도한 것으로서 熱重量分析 情報은 既 提示된 流動學的 資料에서 나타난 構造變化에 대한 모델을 認定하고 있다. 다시 말해 시멘트페이스트에 있어서 물의 결합은 凝集構造의 形態라는 物理學的인 측면과 水和生成物의 일부라는 化學的인 측면에서의 兩面性이 있는 것이다. TGA를 위해 시료를 乾燥시키기 위한 과정은 化學的 結合水에 영향을 미치지 않으며 物理的인 결합에 의해 凝集될 수 있는 물의 存在는 거의 없다. 즉 TG는 100 °C 이상에서만 重

量減少를 보이기 때문에 단지 化學的 結合水만 관계가 있는 것이다. Copeland와 Kantro¹¹⁾에 의하면 本實驗에서 초기에 생성된 餘他 水和生成物의 量은 에트링가이트에 비하면 무시해도 좋을 정도이며 더우기 최초의 에트링가이트 結晶은 3분 후에 나타나게 될 것이다. 그러므로 에트링가이트의 化學的 結合水を 全體結合水로 간주하여 論하는 것에는 妥當性이 있다.

이의 생성에 있어서 에트링가이트는 많은 양의 물分子와 결합된 것이지만 물分子를 강하게 붙들고 있지도 않으며 均等하게 나타나지도 않는다. 즉 等溫放濕曲線 (Desorption isotherm)은 有效한 32個 分子 중 20개 이상 移脫되었을 때만 構造의 變化¹³⁾⁻¹⁴⁾를 시사하고 있으며 9~15개 정도의 分子移脫 정도로서는 XRD 패턴에 영향을 주지 못하는 것이다.¹⁵⁾

<그림-6>의 TG 曲線에서 보는바와 같이 6분간 水和된 후의 結合水量은 OPC보다 더 많은 量이 결합된 NSC 중의 $C_4A_3\bar{S}$ 함량과 관계가 있음을 나타내고 있다. 그러나 그 위에 높은 剪斷率의 條件下에서 10분간 水和시킨 후의 NSC 페이스트의 結合水量은 물分子 9개의 移脫에 해당하는 약 27%가 감소하게 된다. 이 범위는 에트링가이트의 結晶構造에 아무런 영향이 없다. 이와는 對照的으로 OPC 페이스트에서의 結合水量은 대단히 증가하고 있다. 어느 경우에 있어서나 剪斷은 물 자체가 移脫되도록 하거나 또는 에트링가이트로부터 물分子의 移脫을 위한 다른 몇가지의 메카니즘에 好條件을 提供하게 됨을 보여주고 있다. 단지 에트링가이트 자체의 量的 減少인지, 아니면 그 에트링가이트내의 水分含量의 減少인지는 TG 曲線으로는 區別이 불가능한 것으로 判斷된다. 여기서 提示된 결과들에 대해 解析해 보자면, 에트링가이트가 일단 形成되면 6분과 16분 사이에서의 剪斷으로는 破壞되지 않는다는 것이다. 이 假定을 確認하는 데는 또다른 테크닉의 이용이 필요하게 될 것이다.

물의 移脫은 에트링가이트의 結晶構造, 또는 容積을 변화시키지 않는다. 오히려 페이스트 內의 全自由水에 寄與하며 流動性を 促進시킨다. 그러므로 물이 두 段階의 過程을 통해 에트링가이트로부터 移脫되는 것을 알 수 있는 半로그

토오크 對 時間의 플롯으로서 交叉하는 두 直線을 그려볼 필요가 있는 것이다. 기울기의 차이는 에트리팅가이트 內의 물의 結合強度의 차이와 그 移脫에 要求되는 에너지의 차이에서 오는 結果라 할 수 있다. 이는 앞의 方程式에서 時間의 常數인 B에 의해 직접적인 영향을 받는다.

5. 結 論

非收縮性 시멘트의 流動學的 舉動은 一般的으로 보통포틀랜드시멘트의 그것과 類似하다. 이에 是 혼합후 짧은 시간내에 構造의 降伏現象을 나타내는 빙행 流體로서의 현상이 나타나고 있다. 다시 몇 분 후 構造의 累積으로 인해 에트리팅가이트가 생성하게 된다. 同軸실린더 粘度計로부터 얻은 流動曲線에서는 循環時間이 증가함에 따라 OPC에서 나타난 것과 비슷한 현상이 나타나고 있다. 그러나 NSC 페이스트에서는 에트리팅가이트의 初期生成과 비교적 큰 比表面積으로 인해 OPC 페이스트보다 매우 높은 降伏値와 다소 높은 塑性粘度를 나타내고 있다.

定常剪斷下에서의 NSC 페이스트 構造의 降伏現象은 OPC 페이스트로부터 Tattersall에 의해 最初로 確立된 토오크 對 時間의 指數關係式으로 表現할 수 있을 것이다. 이러한 剪斷效果는 페이스트 內의 自由水量的 증가와 回轉실린더에서의 토오크 減少로서 에트리팅가이트에 결합된 물이 移脫되었기 때문이다. 이는 OPC 페이스트에서의 降伏現象에 대한 理由와는 다른 메카니즘이라 할 수 있다.

(資料 : *Advances in Cement Research* Vol. 1-1. Oct. 1987. pp. 45-51)

〈參 考 文 獻〉

- 1) KURDOWSKI, W. *Poradnik technologa przemyslu cementowego (The guide-book for cement industry process engineers)*. Arkady, Warsaw, 1981. pp. 124-5.
- 2) KURDOWSKI, W. and SORRENTINO, F. Special cements. *Structure and performance of cements*. Barnes, P. Editor. London, Applied Science Publishers, 1983. pp. 471-554.
- 3) THIEL, A. *A study of concretes with non-shrink-*

ing cement produced on laboratory and technological scale (in Polish). Reports of the Institute of Building Materials, Cracow, 1985. pp. 21.

- 4) PIASTA J. *Properties of concretes with non-shrinking cement* (in Polish). Reports of the Institute of Technology and Organisation of Construction, Technical University of Kielce, 1985. pp. 79.
- 5) BANFILL, P. F. G. and SAUNDERS, D. C. On the viscometric examination of cement pastes. *Cement and Concrete Research*. Vol. 11, 1981. pp. 363-70.
- 6) TATTERSALL, G. H. and BANFILL, P. F. G. *The rheology of fresh concrete*. London, Pitman, 1983. pp. 356.
- 7) TATTERSALL, G. H. The rheology of Portland cement pastes. *British Journal of Applied Physics*. Vol. 6, No. 5, May 1955, pp. 165-7.
- 8) NESSIM, A. A. and WAJDA, L. R. The rheology of cement pastes and fresh mortars. *Magazine of Concrete Research*. Vol. 17, No. 51, June 1965. pp. 59-68.
- 9) PUDZINSKI, L. R. *Rheology of fresh cement paste* (in Polish). Scientific Proceeding B-16, Technical University of Kielce, 1983. pp. 81-120.
- 10) TATTERSALL, G. H. and DIMOND, C. R. The use of the coaxial cylinders viscometer to measure the rheological properties of cement pastes. *Hydraulic cement pastes: their structure and properties*. Slough, Cement and Concrete Association, Publication 15. 121, 1976. pp. 118-33.
- 11) COPELAND, L. E. and KANTRO, D. F. Hydration of cement. *The Chemistry of Cements*. Taylor, H. F. W. Editor. London, Academic Press, 1964. Vol. 1, pp. 348-9.
- 12) LOCHER, V. and RICHARTZ, V. Study of the hydration mechanism of cement. *6th International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow, 1974*. Moscow, Stroyizdat, 1976. Vol. 2, Book 1, pp. 122-33.
- 13) LUDWIG, V. *Tätigkeitsbericht des Forschungsinstituts der Zementindustrie*. Berlin, 1971. pp. 80.
- 14) THIEL, A. Factors affecting the volume change of expansive cements, Part 1 (in Polish). *Cement-Wapno-Gips*. Vol. 36, No. 4, 1983. pp. 104-9.
- 15) BERMAN, H. A. and NEWMAN, E. S. Heat of formation of calcium trisulphoaluminate at 25°C. *Chemistry of Cement, Proceedings of the Fourth International Symposium, Washington, 1960*. National Bureau of Standards. Vol. 1, pp. 253-257. ♣